

COMPORTAMENTO DE MANTOS DE ESTRUTURAS PORTUÁRIAS COM BLOCOS CÚBICOS, EM BETÃO, DE DIFERENTES PESOS VOLÚMICOS

GONÇALO CUNHA CAMPOS JORDÃO FELGUEIRAS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Fernando Francisco Machado Veloso
Gomes

JANEIRO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais assim como a todos que me apoiaram

Mar calmo nunca fez bom marinheiros

AGRADECIMENTOS

Não podia começar esta dissertação sem agradecer a todos aqueles que me apoiaram nesta importante fase final da minha vida de estudante.

Antes de mais, é fundamental agradecer a todos que estiveram por trás deste meu importante projeto, nomeadamente ao meu Pai, à minha Mãe, aos meus Irmãos e, claro, à Sofia Vasquez Paulo Cunha que sempre me apoiaram e me ajudaram a tomar as mais difíceis decisões.

Um agradecimento especial ao meu Orientador Sr. Professor Doutor Fernando Veloso Gomes pela transmissão do seu vasto conhecimento, pela disponibilidade e apoio durante todo este tempo.

Um agradecimento à Sra. D. Esmeralda e à Sra. D. Paula que sempre estiveram disponíveis para resolver todo e qualquer problema que fosse surgindo durante esta dissertação.

Um agradecimento à Sra. Professora Ana Maria Proença pela incansável e preciosa ajuda na difícil tarefa da composição das argamassas dos blocos que veio enriquecer o meu básico conhecimento sobre a elaboração de betão.

Sem esquecer, um agradecimento à Sra. D. Cecília Maria Gomes da Silva Barbosa assim como a toda a equipa do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção que sempre estiveram disponíveis para me ajudar e facilitaram bastante o meu trabalho.

Um agradecimento à empresa “Irmãos Cavaco” por cederem os materiais que permitiram a construção dos cubos de elevado peso volúmico.

Ao Sr. Engenheiro Guilherme Paredes e ao Sr. Professor Doutor Paulo Santos, agradeço a ajuda preciosa na resolução dos problemas mais complicados no laboratório de Hidráulica.

Agradeço aos meus amigos pela amizade que sempre tiveram comigo.

Por fim, é importante não esquecer um agradecimento muito especial à Sra. Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho e ao Sr. Professor Francisco Manuel de Oliveira Piqueiro que, embora não tenham estado diretamente envolvidos neste projeto, sempre demonstraram uma enorme amizade e um profissionalismo extremo comigo assim como com todos os alunos. São pessoas que marcaram a minha vida académica e fico eternamente grato por tudo que fizeram por mim.

RESUMO

A presente dissertação irá estudar o comportamento de blocos cúbicos de betão de diferentes pesos volúmicos, em situações semelhantes de agitação marítima incidente, avaliando o limite da estabilidade de cada tipo de bloco em mantos de estruturas portuárias.

Os trabalhos começaram pela construção de blocos em betão fazendo variar a composição da argamassa de forma a atingir quatro pesos volúmicos diferentes. O objetivo primordial consistia em atingir um peso volúmico desejado para os blocos do modelo, usando qualquer material disponível mesmo sendo impossível replicar tal composição em protótipo. Foram aproveitados dois tipos de cubos com pesos volúmicos de 18 e de 28 kN/m³ que tinham sido utilizados em trabalhos anteriores. Os blocos com um peso volúmico habitual de 25 kN/m³, assim como os blocos muito densos de 31 kN/m³, foram produzidos de raiz. Foi construído um molde, à base de silicone, para acomodar os cubos de 3,5 cm de aresta.

Seguidamente, e com todos os blocos prontos a serem ensaiados, construiu-se os modelos no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto onde decorreram todos os ensaios. Estes tinham como objetivo principal, simular determinadas condições nomeadamente uma altura de água; período de onda; cota do coroamento e inclinação do talude, variando apenas a altura de onda incidente. A constância nas especificidades de cada ensaio para todo os tipos de cubos permitiu estudar o seu comportamento em função do peso volúmico.

Esta dissertação tem como objetivo demonstrar a maior eficácia de cubos de elevado peso volúmico. Isto ficou nitidamente demonstrado quando os blocos de elevado peso volúmico resistiram a uma altura de onda que se revelou ser o dobro da resistida pelos cubos de baixo peso volúmico.

PALAVRAS-CHAVE: Peso Volúmico, Cubo de Betão, Talude, Agitação Marítima, Quebramares Portuários

ABSTRACT

This master thesis will report the efficiency of high density concrete on cubic blocks in an armour layer of marine structures. This will be evaluated by experimental process where different density types of cubic block will resist to different wave heights.

The work began by building the cubic shape block with an edge of 3,5 cm. Four different densities were thought, one with a low specific weight, a normal one, a high and the last one with even higher specific weight. The main goal was to be able to achieve those specific weights, even though the practicability of the concrete composition was not possible on a real work. Some types of block were already built from older projects with the unit weight of 18 and 28 kN/m³ and were extremely useful for this thesis. High-density materials were used on the fabrication of the other two types of concrete blocks. Those two materials were left overs of a previous experimental work from a Portuguese breakwater. In order to achieve block with a high specific weight, Haematite and Magnetite were used in the concrete composition. The results were perfect and two types of block were made with a specific weight of 25 and 31 kN/m³. The formwork was made on a silicone base in order to facilitate the removal of the blocks and had the capacity of 80 blocks.

Once finished all cubic blocks, was possible to start the experimental process. Parameters such as the water depth in the tank, the wave period, the structure height and its gradient were kept constant and, on the other hand, the types of blocks and the wave height were changed from test to test. This allowed having the same conditions on all tests.

This study has the opportunity to demonstrate a stronger efficiency of the high specific weight block versus the lower ones. Like it has been experimentally demonstrated the 31 kN/m³ had been successfully exposed to a wave height, without significant damage, that was twice the size of the wave height from the 18 kN/m³ blocks.

KEYWORDS: Specific Weight, Cubic Blocks, Slope, Waves, Marine Structures

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv

Índice Geral

1	Enquadramento	1
1.1.	Motivação.....	1
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Conteúdo da dissertação.....	3
2	Estado de arte	5
2.1.	Cálculo das ações sobre blocos	5
2.1.1	Hudson	5
2.1.2	Van der Meer	6
2.1.3	Parâmetro de Iribarren	7
2.1.4	Blocos de Alta Densidade.....	8
2.1.5	Força ascensional nos blocos.....	9
2.2.	Estudos Desenvolvidos	10
2.3.	Casos de Estudo	11
2.3.1	Molhes do Douro	12
2.3.2	Molhe norte de Aveiro.....	13
2.3.3	Molhes do Porto de Sines	14
2.3.4	Molhe do Porto de Punta Langosteira.....	15
3	Trabalhos Laboratoriais	17
3.1.	Instalações experimentais.....	17
3.1.1	LEMC – Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção	17
3.1.2	Tanque/Canal	17
3.1.3	Sala de controlo	18
3.1.4	Geração de Ondas	19
3.1.5	Aquisição de dados	20
3.2.	Concepção do Modelo.....	21
3.2.1	Moldes	21
3.2.2	Composição das argamassas	23
3.3.	Condição do Ensaio.....	26
3.3.1	Agitação	26
3.3.2	Nível da maré.....	26
4	Resultados	27

4.1.1	Série 1	27
4.1.2	Série 2	29
4.1.3	Série 3	30
4.1.4	Série 4	31
4.1.5	Série 5	33
4.1.6	Série 6	36
4.2.	Análise.....	47
5	Síntese, conclusões e trabalhos futuros	49
6	Bibliografia.....	51

FIGURAS

Figura 1 - Fator de Permeabilidade, P (fonte: CEM)	Error! Bookmark not defined.
Figura 2 – Tipos de Rebentação de Ondas (fonte: CEM)	7
Figura 3 - Ilustração da Força Ascensional dos Blocos	10
Figura 4 - Vista da Barra do Rio Douro, Molhe norte (fonte: naviosavista.blogspot.pt)	12
Figura 5 - Vista da Barra do Rio Douro, Molhe sul (fonte: bp.blogspot.com)	13
Figura 6 – Vista Barra de Aveiro, norte (fonte: icsa.pt)	13
Figura 7 - Vista de Satélite do Porto de Sines (fonte: google.maps.com)	14
Figura 8 – Vista Aérea do Porto de Sines, Molhe este (fonte: joseantoniodemodesto.blogspot.com)	15
Figura 9 - Vista Aerea Porto da Punta Langosteira (fonte: guias.masmar.net)	15
Figura 10 – Secção transversal do Porto da Punta Langosteira	16
Figura 11 – Tanque de Ondas	18
Figura 12 – Sala de Controlo	19
Figura 13 – Gerador de Ondas	20
Figura 14 - Aquisição de Dados	21
Figura 15 - Vista de cima do molde (medidas em cm)	22
Figura 16 - Paredes do molde (medidas em cm)	22
Figura 17 – Molde de Silicone	23
Figura 18 - Disposição Arrumada dos Blocos (vista de frente)	28
Figura 19 – Disposição Arrumada dos Blocos (vista de lado)	28
Figura 20 Colocação mais aleatória dos Blocos	30
Figura 21 – Antes do Ensaio 2 Série 4	32
Figura 22 – Depois do Ensaio 2 Série 4	32
Figura 23 – Vista de Lado Inclinação 4(H):3(V)	33
Figura 24 - Estrutura totalmente destruída	35
Figura 25 - Estrutura para uma Profundidade de 0,30 m com Risberma	36
Figura 26 – Terceiro Ensaio da Sexta Série	37
Figura 27 – Quarto Ensaio da Sexta Série	38
Figura 28 – Quinto Ensaio da Sexta Série	39
Figura 29 – Sexto Ensaio da Sexta Série	39
Figura 30 – Nono Ensaio da Sexta Série	40
Figura 31 – Décimo Ensaio da Sexta Série	41
Figura 32 - Décimo Primeiro Ensaio da Sexta Série	42
Figura 33 – Décimo Terceiro Ensaio da Sexta Série	43

Figura 34 – Décimo Quarto Ensaio da Sexta Série	44
Figura 35 - Décimo Quinto Ensaio da Sexta Série	45
Figura 36 - Onda a rebentar à saída do Batedor	46

TABELAS

Tabela 1 – Valores de K_D Shore Protection Manual (1984) para Cubos	6
Tabela 2 - Valores de K_D Shore Protection Manual (1984)	8
Tabela 3 – Massa Volúmica	24
Tabela 4 - Composição da Argamassa de Magnetite	24
Tabela 5 - Peso Volúmico da Argamassa de Magnetite	25
Tabela 6 - Composição da Argamassa de Hematite	25
Tabela 7 - Características da argamassa de Hematite	26
Tabela 8 - Primeira Série de Ensaios	27
Tabela 9 - Segunda Série de Ensaios	29
Tabela 10 - Terceira Série de Ensaios	30
Tabela 11 - Quarta Série de Ensaios	31
Tabela 12 - Quinta Série de Ensaios	34
Tabela 13 - Sexta Série de Ensaios	36
Tabela 14 - Relação teórica entre a altura de onda com o peso volúmico dos blocos	47
Tabela 15 - Relação experimental entre a altura de onda com o peso volúmico dos blocos	47

GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curvas de Desempenho do Tanque de Ondas	35
---	----

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – Área

D_{n50} – Diâmetro Nominal dos Blocos

f – Número de Fiadas

F – Força Ascensional

g – Aceleração Gravítica

H – Altura de onda Incidente

H_s – Altura de Onda Significativa

k – Constante de Iribarren

K_D – Coeficiente de Estabilidade da Formúla de Hudson

N – Número de Unidades por Área

N_z – Número de Ondas Incidentes no Manto

P – Factor de Permeabilidade do perfil do Quebramar

S – Nível de Estragos Admitidos

S_0 – Relação entre a Altura de Onda com o Comprimento da Mesma

t – Espessura da Camada

W – Peso dos Blocos do Manto

WD – Water Depth

α – Ângulo do Talude face à Horizontal

γ – Peso Volúmico dos Blocos

γ_w – Peso Volúmico da Água

Δ – Densidade Submersa Relativa

ξ – Parâmetro de Rebentação

ρ_w – Peso Volúmico da Água

CEM – Coastal Engineering Manual

Z.H. – Zero Hidrográfico

LEMC – Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LH – Laboratório de Hidráulica

SHRHA – Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

1

ENQUADRAMENTO

1.1. MOTIVAÇÃO

As fórmulas empíricas de dimensionamento de quebramares relacionam vários parâmetros para calcular o peso individual dos blocos do manto resistente. A altura de onda é um dos parâmetros de dimensionamento característico do local onde será implementado o quebramar. Outros parâmetros como a inclinação do talude, a forma dos blocos e o seu peso volúmico serão adaptados consoante a disponibilidade, nível de segurança e as características do local.

Quanto maior a inclinação do talude maior será a instabilidade individual dos blocos e por outro lado menores serão os galgamentos. Os blocos poderão adotar variadas formas como Tetrápodes, Dolos, Accropods ou até cubos e cada um tem características específicas que consideram a capacidade de *interlocking*, número de camadas necessário no talude, entre outras.

O peso de cada bloco é calculado através da multiplicação do seu volume pelo seu peso volúmico. Quanto maior for o peso volúmico, menor será o volume necessário para atingir um dado peso do bloco. Isto é traduzido numa redução de área exposta e num aumento da eficiência de cada bloco, e consequentemente numa maior estabilidade da estrutura.

A presente dissertação foi motivada pela eficácia dos blocos de elevado peso volúmico e terá o objectivo de enriquecer o até então conhecimento por esta técnica.

1.2. OBJETIVOS

A Costa portuguesa encontra-se toda exposta a grande agitação marítima. Como tal é imperativo que esta esteja protegida com estruturas capazes de aguentar violentas tempestades. Estruturas como quebramares e esporões que dão proteção a grandes portos, marinas de recreio, de pesca e até a praias, têm vindo a sofrer grandes evoluções. Um dos maiores desenvolvimentos foi verificado nos materiais utilizados na proteção dos quebramares de taludes.

A proteção dos quebramares de taludes é feita com blocos de rocha natural ou de betão que podem assumir variadas formas. Os blocos de rocha natural poderão ser mais económicos, no entanto, poderão não estar disponíveis com as dimensões e pesos pretendidos. Os blocos podem ter formas simples como cubos, mas também adoptarem formas mais complexas como Tetrápodes, Accropod ou Dolos. A forma cúbica é a mais antiga e é até agora a que se revela mais eficaz, tendo em linha de conta a durabilidade e eficácia, pela elevada estabilidade estrutural individual. Não obstante, estes requerem maior quantidade de betão o que os pode tornar mais dispendiosos. Por outro lado, os Tetrápodes e os Dolos requerem cofragens mais complexas e a sua colocação no talude é mais complicada. Estes elementos são estruturalmente mais frágeis quando comparados com os cubos devido à sua forma esbelta. A utilização de armaduras em estruturas deste tipo é altamente desaconselhada visto que estarão permanentemente em contacto com água salgada e qualquer infiltração conduziria à oxidação da mesma provocando problemas graves que comprometeriam o bom funcionamento da estrutura. Assim, qualquer rotura num bloco reduz significativamente o seu peso, sendo esta diminuição traduzida num aumento da mobilidade da peça partida que facilmente será projetada pela ação das ondas contra a estrutura. Este facto pode levar a grandes acidentes que são de todo evitáveis.

A presente dissertação irá abordar apenas os cubos de betão e analisar o comportamento de diferentes pesos volúmicos do betão em mantos expostos de quebramares. Será realizado um modelo laboratorial em 2D a fim de estudar a sua estabilidade, comparando situações tipificadas. O modelo laboratorial terá como intuito replicar o peso volúmico de um betão de alta densidade utilizando materiais disponíveis e se necessário elaborar composições impossíveis de serem utilizados em protótipo.

1.3. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está integrada no curso de “Mestrado Integrado de Engenharia Civil” da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e está dividida em cinco capítulos principais, a saber:

- Enquadramento;
- Estado de Arte;
- Trabalhos Laboratoriais;
- Síntese, Conclusões e Trabalhos Futuros;
- Bibliografia.

No primeiro capítulo, “Enquadramento”, será feita uma breve introdução sobre o trabalho realizado e está dividida em três subcapítulos: Motivação, Objetivos e Conteúdo da Dissertação.

O segundo capítulo “Estado de Arte” terá três subcapítulos que descreve a forma como é calculada a ação das forças nos blocos, bibliografia pesquisada e alguns casos reais onde foram utilizados cubos de betão com elevados pesos volúmicos.

No terceiro capítulo, “Trabalhos Laboratoriais”, será feita, inicialmente, referência a todos os equipamentos utilizados, descrevendo-os para uma melhor compreensão acerca do seu funcionamento. Posteriormente, serão descritas as condições de ensaio e, por fim, os resultados obtidos e uma análise crítica aos mesmos.

O quarto capítulo é destinado a uma síntese e conclusões dos trabalhos elaborados. É também apresentado uma sugestão sobre possíveis realizações de trabalhos futuros.

O último capítulo é reservado para as referências bibliográficas utilizadas.

2

ESTADO DE ARTE

2.1. CÁLCULO DAS AÇÕES SOBRE BLOCOS

O dimensionamento de um quebramar prende-se com as suas singularidades e diversos parâmetros como a sua geometria, composição estrutural, o tipo de exposição à agitação marítima, profundidade, tipo de fundo e amplitude de maré influenciam o seu dimensionamento hidráulico e hidráulico/estrutural. O dimensionamento hidráulico prende-se com a implantação, o comprimento da obra e com a cota de coroamento para conseguir a defesa necessária. Por outro lado, no dimensionamento hidráulico/estrutural é definida a geometria do perfil e o peso dos blocos a utilizar a fim de se verificar a resistência para a ação de projeto. Os pontos singulares são zonas mais solicitadas e de maior instabilidade o que requer maior atenção na altura do dimensionamento. Estas zonas são o enraizamento, a cabeça e as curvas.

Em geral os quebramares estão sujeitos a um elevado grau de exigência e como tal a segurança da estrutura só pode ser garantida à custa de uma grande reserva de resistência, o que poderá tornar excessivamente caros e/ou de construção difícil (Taveira-Pinto 2001).

Assim, será difícil elaborar um trabalho cuidado com elevado grau de segurança e de custo reduzido. No entanto, há fatores que não são controláveis. Um temporal poderá pôr em causa o decorrer normal da obra ou levar à destruição parcial do quebramar. Por este motivo, é habitual optar pela interrupção da obra no período de inverno. É feita uma cabeça provisória com material mais resistente, usualmente utilizado na cabeça definitiva da estrutura.

Durante o período de exploração, a estrutura sofrerá alguma deterioração provocada pela constante agitação, que levará a assentamentos na estrutura e até à rotura de alguns blocos. A rotura de blocos torna a estrutura bastante instável pois um bloco que parta a meio vê o seu peso reduzido para metade, isto leva a que seja transportado mais facilmente pelas ondas e poderá danificar a superestrutura levando ao colapso do quebramar.

O pré-dimensionamento de um quebramar de talude é ainda hoje realizado de modo semi-empírico, com base em fórmulas deduzidas a partir de considerações teóricas simplificadas, em resultados de ensaios em modelo reduzido e na experiência acumulada (Taveira-Pinto 2001).

2.1.1 HUDSON (1959)

A fórmula de Hudson relaciona o peso dos blocos no manto do talude com a altura de onda incidente através da fórmula (1):

$$W = \frac{\gamma \cdot H_s^3}{K_D \left(\frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} \right)^3 \cot g \alpha} \quad \text{ou} \quad \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot g \alpha)^{1/3} \quad (1)$$

onde W representa o Peso dos Blocos do manto; γ representa peso volúmico dos blocos; H_s representa a altura de onda significativa; γ_w representa o peso volúmico da água; α representa o ângulo do talude com a horizontal e K_D representa o coeficiente de estabilidade da fórmula de Hudson.

O coeficiente de estabilidade (movimento dos blocos), K_D , é um parâmetro empírico função do tipo, forma e localização do bloco, colocação, rugosidade, encaixe, permeabilidade do manto e número de camadas.

Tomando em consideração o Shore Protection Manual (1984) pode-se determinar o valor de K_D para cubos, dependendo da localização dos mesmos e do tipo de rebentação a que estão sujeitos, se dentro se fora da zona de rebentação.

Tabela 1 – Valores de K_D Shore Protection Manual (1984) para Cubos

Tipo de Bloco	Número de Camadas	Perfil Corrente		Cabeça	
		Dentro da Zona de Rebentação	Fora da Zona de Rebentação	Dentro da Zona de Rebentação	Fora da Zona de Rebentação
Cubos	2	6.5	7.5	-	5.0

Analisando criticamente a fórmula de Hudson verifica-se que não é tomada em linha de conta a destrutibilidade individual dos blocos.

2.1.2 VAN DER MEER (1988)

Contrariamente à fórmula (1), a fórmula de Van der Meer considera não só o número de ondas incidentes mas também o nível de estragos na estrutura que torna mais realista a análise das ações.

Quebramares não galgáveis:

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = (6.7 N_{od}^{0.4} / N_z^{0.3} + 1.0) S_m^{-0.1} \quad (2)$$

onde H_s representa a altura de onda significativa; D_n representa a dimensão da aresta do bloco; Δ corresponde à densidade submersa relativa; N_{od} o nível de danos na estrutura e N_z o número de ondas que incidem no manto.

Esta fórmula só é aplicável caso se trate de um quebramar não galgável, haja duas camadas de blocos de colocação aleatória, inclinação do talude de 3:2, grandes profundidades e para agitação irregular.

Tabela 2 - Nível de danos na Estrutura N_{od}

Tipo de Bloco	Inclinação do talude	Início dos danos	Danos intermédios	Ruína
Cubos	3:2	0	-	2

2.1.3 PARÂMETRO DE IRIBARREN

O fenómeno da Figura 1 da força de inércia nos blocos devido ao efeito de refluxo, está diretamente relacionado com a maneira como a onda rebenta sobre a estrutura.

O Coastal Engineering Manual, CEM, tipifica a forma como a onda rebenta sobre a estrutura através do parâmetro de Iribarren, ξ . Este parâmetro foi inicialmente concebido para ondas regulares com a equação (3):

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_0}} \quad (3)$$

sendo α o ângulo que o talude faz com a horizontal e s_0 a relação entre a altura de onda com o comprimento da mesma.

O resultado do número de Iribarren pode ser comparado com a Figura 1.

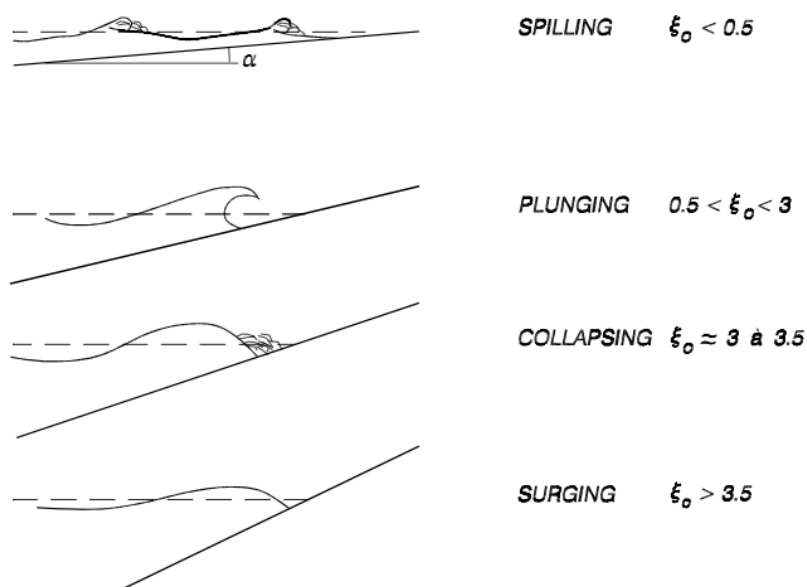


Figura 1 – Tipos de Rebentação de Ondas (fonte: CEM)

2.1.4 BLOCOS DE ALTA DENSIDADE

Analisando as fórmulas acima descritas conclui-se que para aumentar a estabilidade de uma estrutura pode-se melhorar certos parâmetros como aumentar o valor de K_D , na fórmula de Hudson, usado blocos de formas especiais, diminuir a inclinação do talude e aumentar o peso volúmico do material nos blocos.

No primeiro caso, a utilização de formas mais peculiares como Tetrápodes, Akmons, Dolos e Accropodes leva a um aumento do valor de K_D . A Tabela 3 mostra o intervalo de valores para as formas acima mencionadas.

Tabela 3 - Valores de K_D Shore Protection Manual (1984)

Tipo de Bloco	Número de Camadas	Perfil Corrente	
		Dentro da Zona de Rebentação	Fora da Zona de Rebentação
Tetrápode	2	7	8
Akmon	2	8	9
Dolos	2	15,8	31,8
Accropode	--	12	15

O aumento do valor de K_D conduz à redução no peso necessário por unidade de cada bloco ou, por outro lado, com o mesmo peso de cada bloco leva a uma resistência maior à altura de onda.

Triemstra (2000) realizou um estudo acerca do uso de betão de alta densidade em mantos de quebramares estudando a viabilidade das formulas de dimensionamento e comparando blocos de alta densidade com blocos de densidade normal.

Com a análise das fórmulas de estabilidade verifica-se que são todas do tipo:

$$\frac{H_s}{D} = K_{a,b,m} \dots \times \Delta \quad (4)$$

H_s é a altura de onda, D o diâmetro nominal dos blocos, Δ a densidade relativa e K_{abm} representa os coeficientes relativos à inclinação do talude, ao nível de danos, número de ondas, período de ondas etc.

Através da fórmula (4), considerando a mesma altura de onda, consegue-se avaliar a influência do peso volúmico. Tendo dois tipos de betão, um betão cuja massa volúmica seja elevada ($\rho=4000\text{kg/m}^3$) e outro betão cuja massa volúmica seja normal ($\rho=2200\text{kg/m}^3$) vem que:

$$\frac{H_s}{\Delta_1 D_1} = \frac{H_s}{\Delta_2 D_2} \quad (5)$$

Como a altura de onda significativa é igual nos dois casos vem que:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \quad (6)$$

As densidades relativas das massas volúmicas de 4000kg/m³ e de 2200kg/m³ são:

$$\Delta_1 = \frac{2200 - 1025}{1025} = 1,15 \quad (7)$$

$$\Delta_2 = \frac{4000 - 1025}{1025} = 2,90 \quad (8)$$

Como tal a relação entre os dois diâmetros nominais é:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{2,90}{1,15} = 2,5 \quad (9)$$

Significa isto que, neste caso, o bloco de menor massa volúmica poderá ter um diâmetro nominal de 2,9 vezes inferior ao de massa volúmica superior. Fazendo os cálculos para o peso real do bloco vem:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{D_1^3 \times \rho_1}{D_2^3 \times \rho_2} = \frac{2,5^3 \times 2200}{1^3 \times 4000} = 8,6 \quad (10)$$

Conclui-se que o peso será reduzido em 8,6 vezes.

Contudo outras considerações são extremamente importantes como a forma dos blocos, posicionamento entre eles e ângulo do talude. Estas componentes têm uma influencia maior no calculo da estabilidade da estrutura em ângulo de taludes mais acentuados, como 1:1,5.

2.1.5 FORÇA ASCENSIONAL NOS BLOCOS

Na Figura 2, o refluxo (a) consiste no recuo da água através da gravidade após ter atingido o nível mais elevado do talude, este fenómeno resulta em forças de arrastamento, de inércia e impulsos verticais que poderão trazer problemas de estabilidade à estrutura. A permeabilidade e a geometria do talude é de extrema importância pois a água poderá ter dificuldade em sair da camada de filtros e provocar pressões negativas (b) comprometendo a sua estabilidade.

Como o espraçamento é maior que o refluxo, verifica-se uma subida do nível freático dentro da estrutura. Por isso, quando se aproxima a onda seguinte há um incremento de pressões sob a onda resultando em pressões verticais ascendentes (c), que altera consideravelmente o campo de velocidades na aproximação da onda (d).

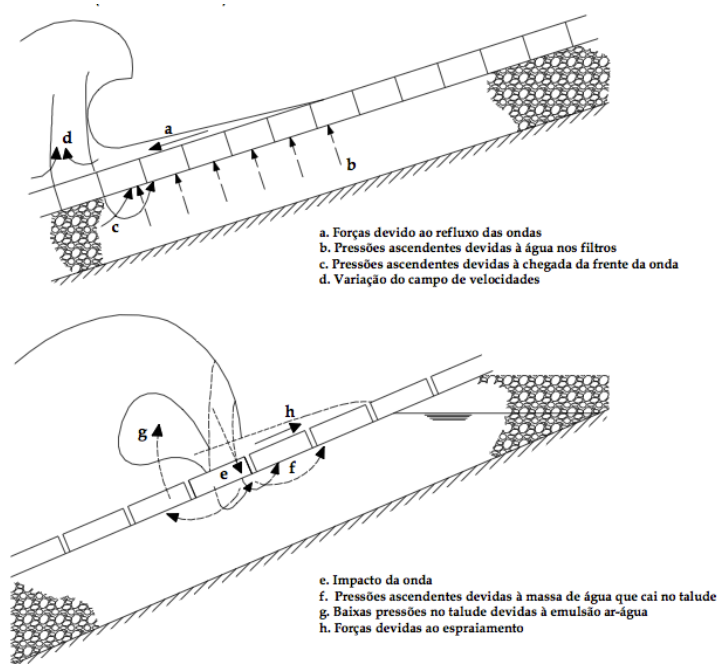


Figura 2 - Ilustração da Força Ascensional dos Blocos

No caso de ocorrer a rebentação da onda sobre o revestimento do talude (e), estas forças serão transmitidas ascendentemente nas camadas inferiores originando, igualmente, pressões ascendentes (f). Durante o período de rebentação da onda, que é de cerca de 0,1 segundos, pode haver uma redução de pressão no talude devido à emulsão de ar-água (g). Este fenómeno pode atingir valores inferiores à pressão atmosférica. Segue-se o espraçamento que por norma não traz problemas, exceto quando os blocos são rugosos ou tiverem sido sobrelevados. Caso tal se verifique, ocorre forças de arrastamento, inércia e de levantamento (h).

Com o rebentamento das ondas no talude são geradas pressões negativas na estrutura, como foi referido, e o peso efetivo dos blocos será inferior ao real. Como tal, a força ascensional, F , é traduzida através da expressão (11):

$$F = k \rho_w g A H \quad (11)$$

sendo k uma constante proposta por IRIBARREN (1938), ρ_w o peso volúmico da água, g a aceleração gravítica, A a área projetada na direção da força ascensional e H a altura de onda. A grande vantagem da utilização de grandes pesos volúmicos em blocos de betão reside na redução do parâmetro A , ou seja, na área solicitada. Com isto é possível reduzir a força ascensional e aumentar a estabilidade da estrutura.

2.2. ESTUDOS DESENVOLVIDOS

Um dos grandes desafios na construção de um quebramar é relacionar a viabilidade construtiva com o bom funcionamento e durabilidade da estrutura. O estudo desenvolvido por Hans F. Burcharth (2007) relaciona os aspectos de design/projeto com os de construção e foca cenários com profundidades superiores a 20 m em locais expostos a ondas grandes.

A colocação dos cubos/blocos depende essencialmente de quatro fatores.

- Incerteza na posição relativa de cada bloco
- Número de unidades por área, N
- Permeabilidade, P
- Espessura da(s) camada(s), t

Existe uma relação entre cada um dos parâmetros referidos anteriormente. Depois de o cubo ser colocado haverá uma incerteza sobre a sua posição. No entanto, esta incerteza poderá ser minimizada ou até anulada com a inspeção permanente de um mergulhador profissional ou através de sondas de medição. Caso não estejam reunidas todas as condições de segurança para haver um mergulhador na água, a posição dos blocos poderá ser avaliada através de um rigoroso controle dos parâmetros N, P e t. A porosidade P está dependente exclusivamente da espessura das camadas uma vez conhecido o parâmetro N. A espessura das camadas, t, está sempre definida nos desenhos técnicos, no entanto, é muito difícil controlar este parâmetro em obra.

$$P = \frac{\text{Volume de vazios}}{\text{Volume total}} = 1 - \frac{\text{volume de betão} / \text{Área}}{t} \quad (12)$$

Quanto maior for a rugosidade e a permeabilidade da estrutura, menor serão os galgamentos, no entanto, mais instável será a estrutura. Por isso, é aconselhável que locais menos expostos à grande agitação marítima adotem uma superfície regular tanto por questões de facilidade de construção como por maior durabilidade da estrutura. A maior facilidade na construção de estruturas regulares advém do facto de a primeira camada de blocos assentar numa superfície lisa. Como consequência, haverá maior probabilidade de galgamento do quebramar.

Os deslocamentos/assentamentos são fenómenos que podem por em causa o funcionamento de uma estrutura, contudo estes não poderão ser totalmente evitados. As principais causas de deslocações de blocos devem-se à compactação vertical inesperada de camadas inferiores, ao deslizamento de blocos inferiores e da deformação da cama de suporte da estrutura. Logo, maiores assentamentos e deslocamentos estão diretamente relacionados com grandes taludes e de grandes inclinações assim como estruturas com elevada porosidade inicial. Normalmente, os deslocamentos provocam aberturas na parte superior do quebramar.

É preferível que os assentamentos/deslocamentos se dêem devido à ação das ondas durante a fase de construção, desde que não sejam completamente destrutivos. Só assim é possível evitar elevados custos com a reparação fora do período de construção. É impossível prever e estudar o fenómeno de assentamento/deslocamentos em modelos devido a enormes erros de escala.

2.3. CASOS DE ESTUDO

O betão de alta densidade poderá ter um grande potencial em estruturas de proteção costeira. O betão com elevado peso volúmico permite adotar uma das duas seguintes estratégias:

- Aproveitar as cofragens de antigas obras conseguindo assim com o mesmo volume de betão obter cubos de maior peso.
- Reduzir o volume, e consequentemente a área exposta, sem comprometer o peso do bloco reduzindo por isso a ação das ondas sobre o bloco.

Esta técnica tem sido cada vez mais utilizada em obras recentes. Este capítulo irá relatar alguns casos onde o betão de alta densidade foi adotado em Portugal.

2.3.1 MOLHES DO DOURO

Devido a um constante perigo à navegação marítima na Barra do Rio Douro foi aprovada a realização das “Obras de Melhoria de Acessibilidade e Segurança da Barra do Rio Douro”. Estas obras conseguiram diminuir os grandes fenómenos de erosão e sedimentação sentidos no canal, que dificultavam muito a navegabilidade. Isto levava a que fosse necessário recorrer a pilotos que devido ao seu largo conhecimento da zona eram capazes de reduzir o perigo de acidentes com as embarcações.



Figura 3 - Vista da Barra do Rio Douro, Molhe norte (fonte: naviosavista.blogspot.pt)

O molhe norte é constituído por um quebramar vertical constituído por aduelas e caixotões de betão prefabricados que foram preenchidos por betão e enrocamento. Este tem um comprimento de 520 m e uma orientação para oeste. Embora seja ocasionalmente galgável devido a tempestades, tem também uma componente lúdica.

O molhe sul encontra-se um quebramar destacado constituído por enrocamento e blocos Antifer de 80 kN de alta densidade (32kN/m^3). O molhe de 470 m de comprimento é galgável e inacessível por terra. Existe um tómbolo incompleto que é reforçado por enrocamento que liga, de forma submersa, o quebramar ao cabedelo.

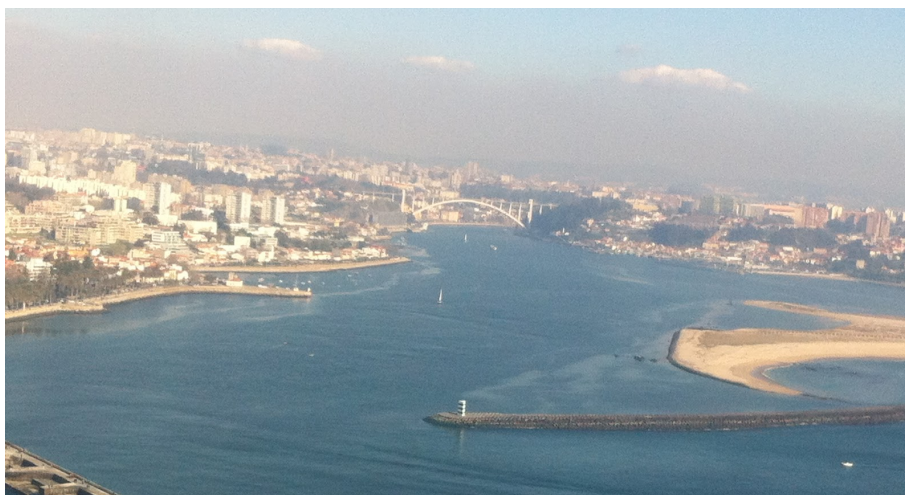


Figura 4 - Vista da Barra do Rio Douro, Molhe sul (fonte: bp.blogspot.com)

2.3.2 MOLHE NORTE DE AVEIRO

A barra de Aveiro também foi alvo de uma intervenção de forma a reconfigurar o canal de aproximação e facilitar o tráfego em segurança de navios de maiores dimensões. Hoje em dia, é possível entrarem navios na barra de Aveiro com 200 m de comprimento e 10,5 m de calado. Apenas foram feitos blocos de $20,83 \text{ m}^3$, no entanto, com diferentes pesos volúmicos conseguiu-se obter blocos com 500kN e de 604kN, respetivamente, 24 e 28 kN/m³. Isto permitiu rentabilizar espaço no estaleiro de obra uma vez que só foi utilizado um tipo de cofragem.

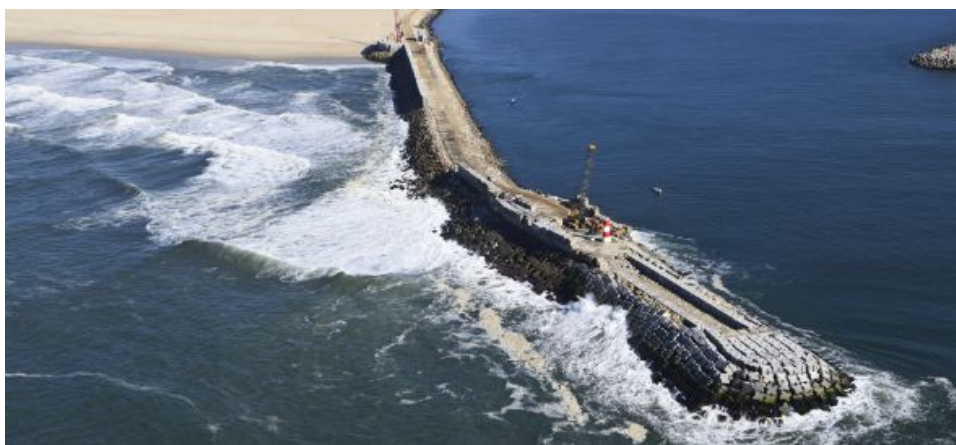


Figura 5 – Vista Barra de Aveiro, norte (fonte: icsa.pt)

2.3.3 MOLHES DO PORTO DE SINES

O Porto de Sines é o maior porto nacional com águas bastante profundas a chegarem aos -53.0m (Z.H.).

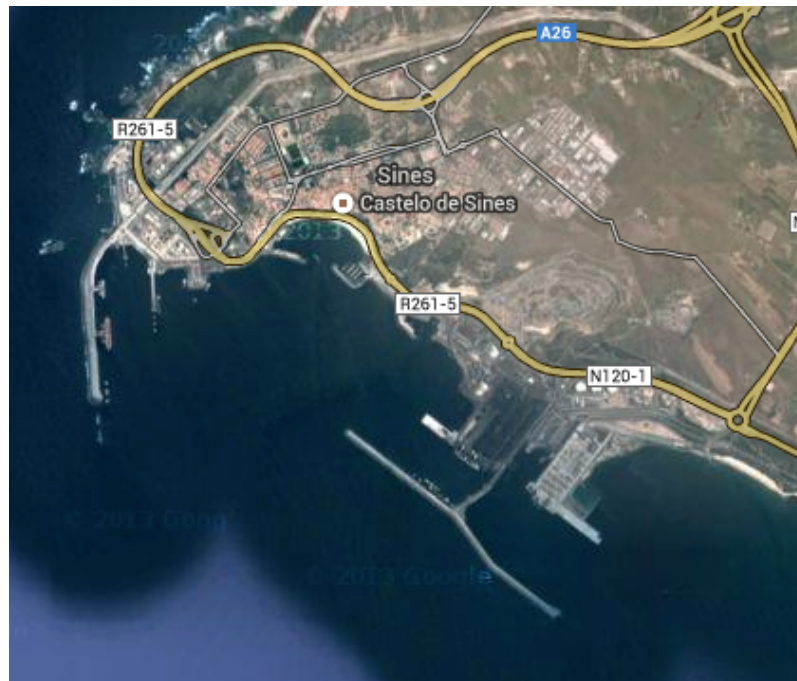


Figura 6 - Vista de Satélite do Porto de Sines (fonte: google.maps.com)

Em 1973, foi iniciada a construção do Porto de Sines. Quando a construção do molhe oeste estava praticamente terminada, em fevereiro de 1978, registou-se uma grande tempestade que causou elevados estragos. Pouco tempo depois, outra grande tempestade de dezembro de 1978 a fevereiro de 1979 danificou violentamente o manto exterior e quase levou ao colapso de toda a estrutura.

Recentemente o molhe leste do Porto de Sines foi alvo de um projeto de ampliação que envolveu:

- Fabrico e aplicação de cubos Antifer de 710 kN de betão de alta densidade;
- Fabrico e aplicação de cubos Antifer de 600kN;
- Exploração e colocação de enrocamento;
- Execução da superestrutura do molhe;
- Quebramento de rocha com explosivos e a sua dragagem na bacia de manobra e canal de entrada.

Atualmente, Sines é constituído por dois quebramares. O molhe oeste serve não só de proteção, mas a sotamar é utilizado como estrutura de acostagem ao terminal de grandes líquidos. Este quebramar de talude foi dimensionado para um Hs de 12 m, tem um comprimento de 1600 m e na cabeça do quebramar tem uma profundidade de -53.0 m Z.H.



Figura 7 – Vista Aérea do Porto de Sines, Molhe este (fonte: joseantoniomodesto.blogspot.com)

2.3.4 MOLHE DO PORTO DE PUNTA LANGOSTEIRA

O porto da Punta Langosteira situa-se na Corunha, Espanha. O porto tem um quebramar com mais de 3000 m de comprimento dando abrigo a uma área de 264 hectares. Este porto conta ainda com uma boa ligação por via terrestre tanto por autoestradas como por linha férreas. As águas profundas permitem que grandes embarcações de calados até 30 m possam atracar nos mais de 9 km de linha de acostagem.



Figura 8 - Vista Aerea Porto da Punta Langosteira (fonte: guias.masmar.net)

Para fazer face à habitual agitação marítima que se sente na costa galega o majestoso porto, notório na Figura 8, conta com uma cota de coroamento de +25.0 m Z.H. e fundação à cota -42.0 m do Z.H. O quebramar é constituído com blocos de 1500 kN de peso e o talude tem uma inclinação de 2(H):1(V). A cabeça foi protegida com blocos de 1750 e 1900 kN construídos com betão de elevada densidade.

A Figura 9 é um esquema de secção transversal do quebramar exterior da Punta Langosteira.

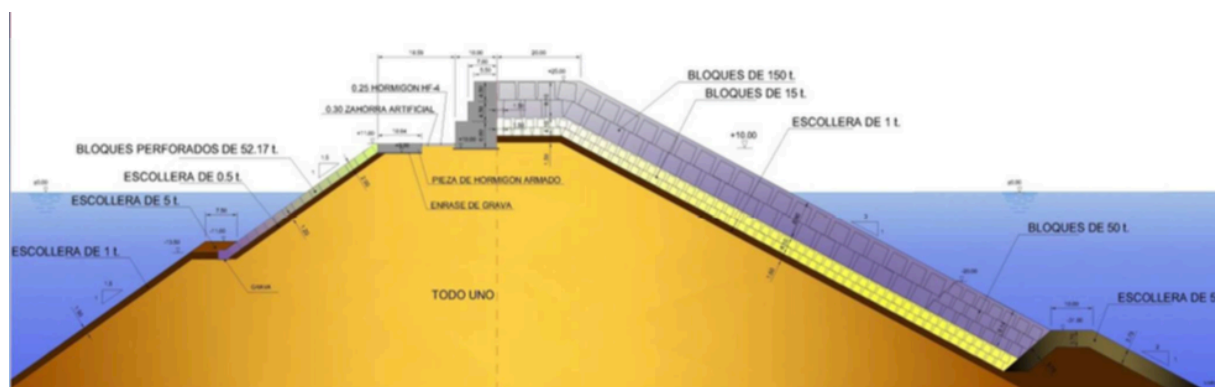


Figura 9 – Secção transversal do Porto da Punta Langosteira

3

TRABALHOS LABORATORIAIS

3.1. INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS

3.1.1 LEMC – LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

A presente dissertação teve a ajuda do LEMC (Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção), situado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), na produção do betão de alta densidade.

O LEMC disponibilizou vastos instrumentos que facilitaram a produção de uma argamassa capaz de replicar ao máximo o efeito pretendido que passava por obter um betão homogéneo sem que a sua pior conceção influenciasse os resultados. A boa homogeneização do betão foi conseguida com balanças rigorosas, uma misturadora e uma mesa de vibração. Quando as condições atmosféricas não eram as ideais para a maturação do betão, este era colocado numa sala onde tanto a temperatura como a humidade são controladas automaticamente para uma perfeita cura do betão.

Por fim, o peso volúmico dos cubos era determinado através da divisão do peso de uma amostra de dez cubos pelo volume de água deslocado pelos mesmos.

3.1.2 TANQUE/CANAL

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) tem um tanque de ondas situado no Laboratório de Hidráulica (LH) da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA). Com 28 m de comprimento, 12 m de largura e uma profundidade máxima de 1,2 m. O sistema de geração de ondas está posicionado num dos topos do tanque, enquanto que no lado contrário existe uma praia de dissipação. A praia de dissipação absorve a energia das ondas evitando assim fenómenos de reflexão que poderiam prejudicar os resultados dos ensaios.



Figura 10 – Tanque de Ondas

3.1.3 SALA DE CONTROLO

A sala de controlo está localizada atrás do sistema de geração de ondas onde, a partir deste, se consegue controlar tanto os aparelhos de medição como a geração de ondas. Neste compartimento do laboratório estão os computadores com o software HR WaveMaker e HR WaveData com os quais são geradas e gravadas todas as características das ondas realizadas durante o ensaio.



Figura 11 – Sala de Controlo

3.1.4 GERAÇÃO DE ONDAS

O sistema de geração de ondas é constituído por 16 pás com 75 cm cada, acionadas por motores elétricos independentes. O facto dos batedores serem independentes resulta na possibilidade de gerar ondas não só perpendiculares a estes mas também criando alguma inclinação e até compensar as ondas refletidas pela praia de dissipação. O software utilizado é o HR WaveMaker. Este é de fácil utilização e permite simular tipos de agitação regular ou irregular e até criar ondas bidirecionais. O software tem ainda a capacidade de ler as ondas refletidas e adaptar a produção das mesmas de forma a evitar o fenómeno de reflexão que poderia por em causa o ensaio e até o próprio tanque de ondas.



Figura 12 – Gerador de Ondas

3.1.5 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados durante os ensaios é feita com sondas que monitorizam, através do software HR WaveData, as várias alturas de água durante o trabalho experimental. Cada sonda consiste em duas barras de aço inoxidável carregadas eletricamente. É, então, medida uma diferença de potencial que está diretamente relacionada com a profundidade de imersão da sonda. A calibração deste aparelho é imprescindível e consiste em obter uma reta linear que relaciona a diferença de potencial com a profundidade de imersão das mesmas. É fundamental limpar sempre as sondas antes de qualquer ensaio uma vez que estas ganham com o tempo sujidade conduzindo assim a erros de medição.



Figura 13 - Aquisição de Dados

3.2. CONCEPÇÃO DO MODELO

O Laboratório de Hidráulica conta já com um vasto *stock* de cubos que foram utilizados em trabalhos anteriores. Um inventário foi elaborado com o intuito de saber as características dos cubos nomeadamente forma, tamanho e peso volúmico. Concluiu-se que os cubos mais abundantes são os de aresta de 3,5 cm. Como tal, seria mais lógico aproveitar esses cubos e produzir outros com um peso volúmico mais elevado.

3.2.1 MOLDES

Com o intuito de produzir cubos com 3,5 cm de aresta de forma rápida, eficaz e sem danificar o molde pensou-se em utilizar acrílico de 1,5 cm de espessura. A base teria as dimensões de 51,5 x 41,5 cm² com 88 paredes fixas de 3,5 x 3,5 cm² e 9 paredes móveis de 51,5 x 3,5 cm². As paredes móveis permitiriam uma grande facilidade não só no processo de descofragem mas também na lavagem das mesmas para uma seguinte utilização. A Figura 14 corresponde à vista de cima da peça em questão seguida do esquema das paredes para uma melhor compreensão.

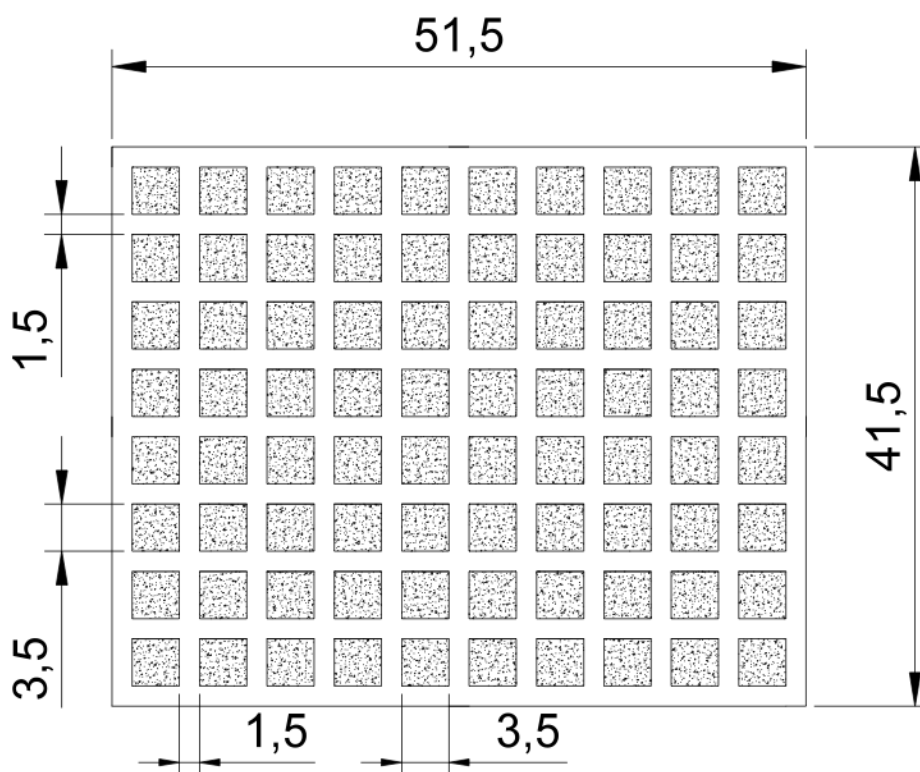


Figura 14 - Vista de cima do molde (medidas em cm)

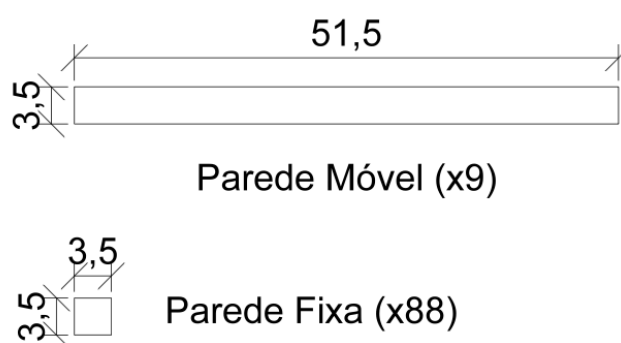


Figura 15 - Paredes do molde (medidas em cm)

Esta ideia foi abandonada visto ser um molde bastante dispendioso de executar. Surgiu, então, a oportunidade juntamente com o INEGI de elaborar um molde com as mesmas dimensões mas de silicone. O molde seria de uma peça só, no entanto como o silicone é bastante maleável consegue-se uma fácil descofragem.

A fim de elaborar o molde de silicone foi necessário maquinar um negativo em acrílico com 80 (8x10) cubos separados por 1,5 cm cada. A peça de acrílico foi mergulhada no silicone líquido que depois de solidificado estava pronto para ser utilizado. Para ajudar a descofrar é utilizado um óleo próprio que

impede que a argamassa fique colada ao molde que juntamente com a grande elasticidade do mesmo facilita em muito este processo.



Figura 16 – Molde de Silicone

3.2.2 COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS

A grande dificuldade em atingir um elevado peso volúmico num betão passa por reduzir a quantidade de água e por acrescentar agregados de grande peso volúmico à argamassa. A água no betão tem como função principal hidratar o cimento e conferir trabalhabilidade à argamassa. A trabalhabilidade consiste na facilidade em amassar a argamassa sem perigo de segregação. Por outro lado, quanto menor for a percentagem de água em relação ao cimento, maior será a sua resistência mecânica e menor será a sua trabalhabilidade.

A utilização de um plastificante reduz a quantidade de água necessária. Neste caso, o plastificante utilizado foi o TECHNIFLOW95.

Os agregados de elevado peso volúmico que foram utilizados foram a magnetite e a hematite. Ambos os materiais foram utilizados em ensaios aquando do projeto do atual quebramar sul da barra do rio do Douro em 2005. Os resultados mostraram-se positivos e hoje em dia conta com blocos Antifer de alta densidade. Foi possível com as sobras dos ensaios elaborar vários cubos, que no entanto não foram suficientes.

Todos os processos relacionados com a elaboração dos cubos decorreram no LEMC – Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção e contaram com a preciosa ajuda da Sra. Professora Ana Maria Proença que, com a sua vasta experiência, facilitou todo este processo.

Antes de qualquer produção é necessário determinar algumas características dos materiais, como por exemplo a massa volúmica que corresponde à razão entre a massa de uma determinada substância (em kg) por unidade de volume (m^3), incluindo o volume de vazios. Uma forma de calcular este parâmetro consiste no preenchimento de um recipiente de volume conhecido e regulamentar de 1 litro (1 dm^3). A

fim de se determinar o peso da amostra, é subtraído o peso do recipiente cheio ao peso do recipiente vazio. O resultado é o peso da amostra num volume de 1 dm³. Este procedimento é repetido três vezes, para cada agregado, para eliminar quaisquer erros. O resultado final é a média dos três valores.

A Tabela 4 identifica o resultado das massas volúmicadas da magnetite e da hematite.

Tabela 4 – Massa Volúmica

Agregado	Massa Volúmica (kg/m ³)
Magnetite	2,10
Hematite	1,61

O resultado da medição das massas volúmicadas foi muito positivo pois provou que ambos os agregados são bastante densos e esperavam-se bons resultados aquando da produção dos cubos.

Como não existe uma “receita” predefinida para uma composição de hematite ou de magnetite foi necessário criar uma. O objetivo sempre foi obter um betão o mais denso possível mesmo se isso implicasse a utilização de materiais inexecutáveis em projeto.

Já existiam dois pesos volúmicados de cubos que foram utilizados em ensaios anteriores, estes tinham um peso volúmico de 18 e de 28 kN/m³. Foi decidido que seria interessante criar dois tipos de cubos, um que seria o mais denso possível e outro com um valor normal na casa dos 24 a 25 kN/m³.

O escasso material não permitia que fossem cometidos erros e uma boa argamassa teria de ser conseguida logo à primeira tentativa. Começou-se por tentar criar um tipo de cubo mais denso possível, utilizando apenas magnetite e sem areia. Todos os materiais eram pesados numa balança com uma precisão extrema (décima do grama). À medida que a argamassa ia sendo amassada numa batedeira, os materiais eram acrescentados cuidadosamente para conseguir um resultado homogéneo. O peso dos materiais utilizados é discriminado Tabela 5.

Tabela 5 - Composição da Argamassa de Magnetite

Material	Peso (kg)
Água	0,585
Cimento	1,950
Techniflow 95	0,0309
Magnetite	4,103

A argamassa foi colocada no molde de silicone que tinha sido previamente preparado. Para facilitar o processo de descofragem, as paredes do molde foram pinceladas com um óleo descofrante.

Ao fim de 48 horas de repouso, os cubos estavam prontos para serem retirados do molde. Estes foram descofrados sem problemas e o molde revelou-se bastante eficaz.

Para obter o peso volúmico de um cubo basta dividir o seu peso pelo seu volume.

Pesou-se uma amostra aleatória de 10 cubos e posteriormente foram mergulhados em água com o objetivo de os saturar, assim consegue-se que qualquer poro seja preenchido por água e o volume de vazios seja preenchido. Uma hora depois os cubos foram colocados num recipiente calibrado e foi medido o volume de água deslocado pelos mesmos. Os valores obtidos são expressos Tabela 6.

Tabela 6 - Peso Volúmico da Argamassa de Magnetite

Característica	Valor
Peso	1,3126 kg
Volume	0,4172 dm ³
Peso Volúmico	3,1 kg/dm ³
Peso Volúmico	30,9 kN/m ³

Com isto conseguiu-se produzir 80 cubos e, infelizmente, foram os únicos cubos que se conseguiram produzir com 31 kN/m³ devido à falta de magnetite.

De seguida, foi utilizado a hematite. A hematite com uma massa volúmica de 1,61 kg/m³ permitia, juntamente com areias, produzir cubos de peso volúmico normal. O processo foi igual ao da magnetite. A composição desta argamassa é expressa na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição da Argamassa de Hematite

Material	Peso (kg)
Água	0,815
Cimento	1,500
Techniflow 95	0,0375
Hematite	2,985
Areias	1,941

Após 48 horas na estufa, onde todas as condições são controladas e ótimas para uma cura perfeita, os cubos foram descofrados e todo o processo de cálculo do peso volúmico foi repetido. Os resultados foram registados na Tabela 8.

Tabela 8 - Características da argamassa de Hematite

Característica	Valor
Peso	1,0545 kg
Volume	0,4183 dm ³
Peso Volúmico	2,52 kg/dm ³
Peso Volúmico	24,7 kN/m ³

Como ainda havia bastante hematite foi possível fazer mais dois moldes. A composição das seguintes argamassas respeitou a estrutura usada na primeira composição da hematite. Com isto, foi possível atingir um peso volúmico igual ao da primeira argamassa.

3.3. CONDIÇÃO DO ENSAIO

O canal, com 80 cm de largura, foi dividido em dois canais com o intuito de conseguir ensaiar dois tipos de pesos volúmicos de uma vez só. Tal foi necessário face ao reduzido tempo laboratorial que foi disponibilizado para este trabalho (no total de duas semanas).

Como foi anteriormente referido, apenas serão alterados os blocos, leia-se o peso volúmico dos blocos, mantendo, portanto, todas as outras variáveis iguais, profundidade no tanque, número de blocos, inclinação e altura da estrutura. Por outro lado, é do interesse deste estudo variar a altura de onda, para cada tipo de bloco, até se conseguir instabilidade na estrutura.

3.3.1 AGITAÇÃO

A agitação variou bastante durante todos os ensaios. Inicialmente foram ensaiadas ondas regulares com período constante. Como os resultados não corresponderam aos esperados foi alterado o tipo de agitação para ondas irregulares. Após alguns ensaios, as ondas irregulares dificultavam a repetição constante e igual de ensaio para ensaio. Como tal, as ondas irregulares foram então abandonadas e a agitação regular foi retomada.

Agitação regular consiste na produção de ondas com uma altura e período constante. Por outro lado, a agitação irregular é definida através de uma gama de alturas de ondas que serão produzidas durante o ensaio.

3.3.2 NÍVEL DA MARÉ

Alterações no nível da maré não foram consideradas neste trabalho. Os primeiros ensaios decorreram com uma profundidade de 0,20 m no tanque de ondas. O resultado não foi o desejado, como tal a altura de água foi aumentada para 0,30 metros.

No subcapítulo 4 serão descritos todos os acontecimentos e falhas que levaram a esta e a todas as modificações.

4 RESULTADOS

Este subcapítulo irá resumir o trabalho, de duas semanas, realizado no Laboratório de Hidráulica da FEUP começando por explicar todas as dificuldades e problemas que foram surgindo com o avançar dos trabalhos. Primeiramente foi conduzida uma série de ensaios que se prendeu com a aprendizagem e funcionamento de todos os aparelhos presentes no laboratório.

As seguintes séries, conjuntos de ensaios, resultaram de alterações que permitiram que muitos erros e falhas fossem retificados. Desta maneira, foram conseguidas as condições ideais de funcionamento dos aparelhos e dos modelos para que os resultados fossem os esperados.

4.1.1 SÉRIE 1

Como foi referido anteriormente, cada ensaio iria testar simultaneamente dois pesos volúmicos de cubos. Esta opção permite uma redução para metade do número de cubos necessários à realização de um ensaio e uma economia de tempo. A divisão do canal a meio fez com que cada talude ficasse com 40 cm de largura.

Os pesos volúmicos dos cubos utilizados nesta série foram de 18 e de 28 kN/m³.

As condições dos ensaios da primeira série são representadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Primeira Série de Ensaios

Série	Ensaio	Cubos (kN/m ³)	Profundidade no Tanque (m)	Tipo de Onda	Altura de Onda (m)	Período de Onda (s)	Duração (s)	Inclinação (H:V)
1	1	18 e 28	0,20	Regular	0,04	0,707	600	3:2
	2	18 e 28	0,20	Regular	0,06	0,707	900	3:2
	3	18 e 28	0,20	Regular	0,06	0,884	600	3:2
	4	18 e 28	0,20	Regular	0,10	0,707	600	3:2
	5	18 e 28	0,20	Regular	0,06	1,179	600	3:2

Esta primeira série de ensaios teve uma arrumação bastante cuidada dos blocos como mostram a Figura 17 e a Figura 18.



Figura 17 - Disposição Arrumada dos Blocos (vista de frente)



Figura 18 – Disposição Arrumada dos Blocos (vista de lado)

Os resultados desta série foram bastante inconclusivos pois houve uma estabilidade total em todos os ensaios. Era previsto, segundo a fórmula de Hudson, que para uma altura de onda de 0,06 m houvesse instabilidade para os blocos de 18 kN/m^3 , mas tal não se verificou.

Esta arrumação influenciou em muito os resultados. O manto foi todo ele colocado, cuidadosamente, no talude criando uma superfície lisa e consequentemente muito estável. Como tal, o espraçamento das ondas foi muito elevado. Transpondo este acontecimento para o protótipo, poder-se-ia falar em

fenómenos de galgamento da estrutura, efeito que poderia não ser muito aconselhado. A baixa rugosidade e porosidade do manto levou a fenómenos de reflexão. A reflexão intensificou-se ao longo do tempo, criando condições deficientes para o ensaio ser validado com exceção do 5º ensaio onde o período de onda foi o maior. Em alguns ensaios, as ondas rebentavam logo à saída do batedor o que invalidava o ensaio.

De forma a resolver os problemas de reflexão foi levado a cabo uma segunda série de ensaios onde foi variado apenas o período de onda. Esta medida contribuiu, também, para eliminar os problemas de “pré-rebentação” das ondas logo a seguir ao batedor.

4.1.2 SÉRIE 2

A segunda série tentou eliminar a rebentação das ondas à saída do batedor e os problemas de reflexão da primeira série. Os blocos ensaiados continuaram a ser os de 18 e de 28 kN/m³ com uma profundidade no tanque de ondas de 0,20 m e com ondas regulares de 0,08 m. Para isso, apenas foi variado o período da onda mantendo-se constante a altura de onda.

A Tabela 10 resume as condições dos três ensaios.

Tabela 10 - Segunda Série de Ensaios

Série	Ensaio	Cubos (kN/m ³)	Profundidade no Tanque (m)	Tipo de Onda	Altura de Onda (m)	Período de Onda (s)	Duração (s)	Inclinação (H:V)
2	1	18 e 28	0,20	Regular	0,08	0,849	900	3:2
	2	18 e 28	0,20	Regular	0,08	0,990	900	3:2
	3	18 e 28	0,20	Regular	0,08	1,131	900	3:2

No primeiro ensaio desta série verificou-se que a onda incidente no paramento era do tipo “collapsing”. Porém, decorridos 10 minutos de ensaio, começou-se a registar fenómenos de 3D no canal, isto é, a onda deixou de ser perpendicular com o canal. Este ensaio foi por isso invalidado. Nos seguintes ensaios, houve desde o início reflexões nítidas e a onda rebentava à saída do batedor. A estabilidade total evidenciou que algo estaria errado e teria de ser corrigido.

Para evitar os fenómenos de reflexão, galgamento da estrutura e da rebentação da onda à saída do batedor três soluções foram propostas:

- Aumentar a profundidade de água no tanque de ondas;
- Reduzir a altura de onda e o seu período;
- Retificar a colocação dos blocos.

A primeira hipótese iria conduzir a uma reconstrução total da estrutura. A cota do coroamento teria de ser elevada para evitar o galgamento ou até a submersão do modelo durante o ensaio. No entanto, a escassez de blocos disponíveis pôs de parte esta solução apresentada.

A redução da altura de onda e do seu período significaria que a estrutura ficava exposta a menores forças traduzindo-se numa estabilidade ainda maior à verificada. Esta solução foi, por isso, eliminada.

A solução mais viável era a de retificar a colocação dos blocos e, conseqüentemente, reduzir o número de cubos utilizados. Inicialmente, os ensaios decorriam com 341 cubos de cada peso volúmico e foram reduzidos para 276 unidades. Esta redução deu início à terceira série de ensaios. É notório na Figura 19, não só a redução do número de cubos mas também a colocação mais aleatória dos mesmos.

4.1.3 SÉRIE 3

Como é demonstrado na Figura 19, houve uma redução no número de cubos e optou-se por uma colocação menos cuidada/arrumada dos mesmos. No entanto, no perímetro de cada amostra os cubos foram cuidadosamente colocados. Esta medida iria prevenir que a queda de um bloco fosse influenciar outra queda de um cubo na amostra vizinha. Esperava-se que esta colocação aleatória dos blocos provocasse alguma instabilidade à estrutura.



Figura 19 - Colocação mais aleatória dos Blocos

A Tabela 11 sintetiza as características dos três ensaios decorridos nesta série. Cada ensaio teve uma duração de 900 segundos (15 minutos).

Tabela 11 - Terceira Série de Ensaios

Série	Ensaio	Cubos (kN/m ³)	Profundidade no Tanque (m)	Tipo de Onda	Altura de Onda (m)	Período de Onda (s)	Número de Cubos	Inclinação (H:V)
3	1	18 e 28	0,20	Regular	0,06	0,849	276	3:2
	2	18 e 28	0,20	Regular	0,08	0,849	276	3:2
	3	18 e 28	0,20	Regular	0,10	0,849	276	3:2
	4	18 e 28	0,20	Regular	0,12	0,849	276	3:2

No primeiro ensaio, com uma altura de onda de 0,06 metros, registou-se uma estabilidade total. Convém lembrar que, segundo a fórmula de Hudson, os cubos com um peso volúmico de 18 kN/m³ não resistiriam a esta altura de onda. Como esperado, os blocos de 28 kN/m³ superaram o ensaio sem que fosse registado qualquer instabilidade.

Durante o segundo ensaio desta série a altura de onda foi aumentada para 0,08 metros. Registou-se, contudo, uma estabilidade total na estrutura. Porém este aumento de agitação revelou que a onda rebentava à saída do batedor e após cerca de 5 minutos de ensaio começou a verificar-se uma maior agitação no lado esquerdo do canal. As causas desta anomalia são desconhecidas.

Nos ensaios seguintes, a altura de onda foi aumentada para 0,10 m e posteriormente para 0,12 m. Fenómenos de reflexão e de rebentação à saída do batedor foram agravados e continuando a haver uma estabilidade na estrutura. Foram, também verificados algum galgamento da estrutura.

Os ensaios até agora foram considerados inválidos visto terem decorrido problemas que por um lado não provocaram a destruição esperada ou que se constatou fenómenos que prejudicavam a recolha de dados.

4.1.4 SÉRIE 4

Foi iniciada a quarta série de ensaios com a intenção de corrigir todos os erros verificados até então. Duas soluções foram tomadas. Começou-se por reduzir, uma vez mais, o número de cubos de cada ensaio e experimentou-se as ondas irregulares.

A redução no número de cubos é feita através de uma fórmula que calcula a densidade de colocação baseada na área ocupada por uma face do cubo.

$$\text{Densidade de colocação} = \frac{\frac{N}{A}}{\frac{f}{\text{Área cubo}}} \times 100\% \quad (13)$$

sendo que N representa o número de blocos necessário para uma dada densidade; A corresponde à área do canal; f é o número de fiadas e Área do cubo corresponde à área de uma face do cubo.

Para uma densidade de 100%, um cubo com uma aresta de 3,5 cm ocupará uma área de 12,25 cm² (3,5 x 3,5 cm²) no talude. Ora, para uma densidade de 50%, um cubo terá de ocupar o dobro da área acima descrita. Os seguintes ensaios decorreram, portanto, com 215 cubos de cada peso volúmico e com ondas irregulares.

Tabela 12 - Quarta Série de Ensaios

Série	Ensaio	Cubos (kN/m ³)	Profundidade no Tanque (m)	Tipo de Onda	Altura de Onda Significativa (m)	Período de Onda (s)	Número de Cubos	Inclinação (H:V)
4	1	18 e 28	0,20	Irregular	0,10	1,1314	215	3:2
	2	18 e 28	0,20	Irregular	0,12	1,1314	215	3:2

Cada ensaio teve uma duração de 30 minutos. A colocação aleatória dos blocos fez com que houvesse duas quedas logo no início do primeiro ensaio desta série. Passados cerca de 12 minutos foram registadas mais quatro quedas nos cubos de peso volúmico de 18 kN/m^3 . No fim do ensaio não houve movimento de nenhum dos cubos de 28 kN/m^3 , apenas foram registadas seis quedas nos cubos de 18 kN/m^3 . Seis blocos movimentados corresponde a menos de 3% significando que a estrutura é considerada estável.

O segundo ensaio desta série seguiu logo após terem sido recolocados os seis cubos deslocados. Para uma altura de onda significativa de 0,12 m observou-se após 10 minutos de ensaio um deslizamento dos dois grupos de cubos. A Figura 20 e a Figura 21 evidenciam o antes e depois, respetivamente, deste ensaio.



Figura 20 – Antes do Ensaio 2 Série 4



Figura 21 – Depois do Ensaio 2 Série 4

O deslizamento de ambos os grupos de blocos pode ter sido devido a dois factores. Foram observadas grandes ondas que rebentavam à saída do batedor, o que por si só invalida o ensaio. Outro facto que pode ter contribuído para um mau resultado do ensaio foi o facto de os cubos não terem sido todos recolocados no fim do primeiro ensaio. Esta causa significa que as condições iniciais do segundo ensaio não foram as mesmas, pequenos assentamentos dos cubos poderão ter ocorrido no primeiro ensaio daí não ter sido registado quedas individuais mas sim um assentamento geral da estrutura.

Mesmo assim, a estrutura em modelo não estava a corresponder aos cálculos efetuados através da fórmula de Hudson. Foi decidido alterar o declive da estrutura de 3(H):2(V) para 4(H):3(V). Assim o talude ficaria mais instável e poderia trazer resultados mais satisfatórios.

4.1.5 SÉRIE 5

A estrutura foi toda remodelada para aumentar o declive do talude. A Figura 22 mostra uma vista de lado da estrutura com uma inclinação de 4(H):3(V).



Figura 22 – Vista de Lado Inclinação 4(H):3(V)

Esta série deu seguimento às ondas irregulares e continuou-se a testar os blocos de 18 e 28 kN/m³. A Tabela 13 descreve pormenorizadamente as condições de cada ensaio que tiveram uma duração de 30 minutos.

Tabela 13 - Quinta Série de Ensaios

Série	Ensaio	Cubos (kN/m ³)	Profundidade no Tanque (m)	Tipo de Onda	Altura de Onda Significativa (m)	Período de Onda (s)	Número de Cubos	Inclinação (H:V)
5	1	18 e 28	0,20	Irregular	0,06	1,1314	215	4:3
	2	18 e 28	0,20	Irregular	0,08	1,1314	215	4:3
	3	18 e 28	0,20	Irregular	0,10	1,1314	215	4:3

No primeiro ensaio desta série verificou-se, como esperado, alguma instabilidade nos cubos de 18 kN/m³, porém, apenas 1,4% dos blocos foram deslocados. Os blocos de 28 kN/m³ tiveram um comportamento estável durante todo o ensaio.

Os cubos foram todos removidos, a estrutura foi reparada e os blocos foram de novo colocados. Este procedimento seria repetido sempre que um ensaio terminasse pois só assim se conseguiria garantir que todos os ensaios começavam com condições o mais semelhantes possíveis e que assentamentos de ensaios anteriores não influenciavam ensaios futuros.

O segundo ensaio desta série contou com uma altura de onda significativa de 0,08 metros com ondas irregulares. Teoricamente, os cubos de 18 kN/m³ apresentariam uma instabilidade para uma altura de onda superior a 0,06 m. No entanto, mesmo com uma altura de onda de 0,08 metros apenas cinco cubos se deslocaram. Isto traduz-se em 2,3% dos cubos deslocados que é cerca de metade dos cubos para que seja considerada como instável a estrutura. Por outro lado e como seria de esperar, os blocos de 28 kN/m³ mantiveram-se estáveis durante todo o ensaio.

No terceiro ensaio, com uma altura de onda significativa de 0,10 m, houve um resultado completamente fora do previsto. Ao fim de cerca de 10 minutos ambas as estruturas abateram por completo devido a uma onda que foi gerada violentamente. Isto levou a que as causas deste inesperado resultado fossem apuradas para que tal não se repetisse.

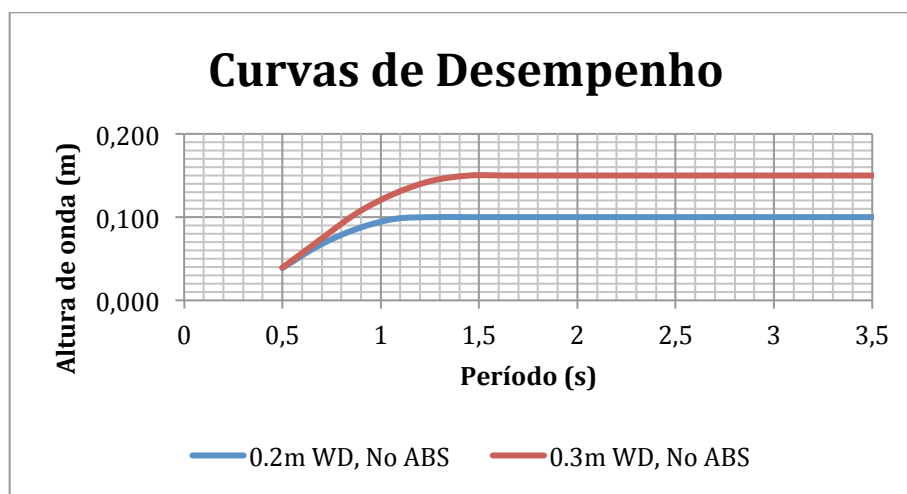
A anormal destruição da ambos os taludes pode ser vista na Figura 23.



Figura 23 - Estrutura totalmente destruída

Este colapso inesperado da estrutura foi resultado de estar a ser exigido ao sistema de geração de ondas uma altura de onda superior à máxima possível com a atual profundidade no canal. No Gráfico 1, é apresentado a altura de onda máxima para um determinado período.

Gráfico 1 - Curvas de Desempenho do Tanque de Ondas



Como se pode observar, a curva a azul corresponde a uma profundidade no tanque de ondas de 0,20 m e que só permite uma altura de onda significativa máxima de 0,10 m. No obstante, para uma profundidade de 0,30 m consegue-se reproduzir ondas de altura não superior a 0,15 m.

Como a ordem de trabalhos consiste em verificar a partir de que altura de onda os diferentes blocos ficariam instáveis foi necessário aumentar a profundidade de água no tanque de ondas. Como tal, a estrutura foi novamente reconstruída para conseguir acomodar tal profundidade sem que fosse necessário aumentar o número de blocos. Uma risberma foi construída como mostra a Figura 24.



Figura 24 - Estrutura para uma Profundidade de 0,30 m com Risberma

4.1.6 SÉRIE 6

A sexta série de ensaios foi iniciada com o aumento da profundidade do tanque de ondas para 0,30 m de água, como anteriormente referido.

As ondas regulares voltaram a ser utilizadas a fim de se conseguir maior semelhança nos ensaios. A inclinação do talude continuou em 4(H):3(V).

Tabela 14 - Sexta Série de Ensaios

Série	Ensaio	Cubos (kN/m ³)	Profundidade no Tanque (m)	Tipo de Onda	Altura de Onda (m)	Período de Onda (s)	Número de Cubos	Inclinação (H:V)
6	1	18	0,30	Regular	0,06	1,697	215	4:3
	2	18	0,30	Regular	0,08	1,697	215	4:3
	3	25	0,30	Regular	0,08	1,697	215	4:3
	4	25	0,30	Regular	0,10	1,697	215	4:3
	5	25	0,30	Regular	0,12	1,697	215	4:3
	6	25	0,30	Regular	0,13	1,697	215	4:3
	7	28	0,30	Regular	0,08	1,697	215	4:3
	8	28	0,30	Regular	0,10	1,697	215	4:3
	9	28	0,30	Regular	0,12	1,697	215	4:3

10	28	0,30	Regular	0,13	1,697	215	4:3
11	28	0,30	Regular	0,14	1,697	215	4:3
12	31	0,30	Regular	0,12	1,697	215	4:3
13	31	0,30	Regular	0,13	1,697	215	4:3
14	31	0,30	Regular	0,14	1,697	215	4:3
15	31	0,30	Regular	0,15	1,697	215	4:3
16	31	0,30	Regular	0,16	1,697	215	4:3

O primeiro ensaio decorreu com uma altura de onda de 0,06 m e toda a estrutura se manteve estável com apenas um bloco de densidade de 18 kN/m^3 a ser deslocado (0,5%). Durante o mesmo ensaio, os cubos de peso volumico de 28 kN/m^3 não registaram qualquer tipo de movimento durante os 30 minutos de ensaio.

O segundo ensaio cuja altura de onda foi de 0,08 m, houve um avanço importante em termos de resultados. Como teoricamente previsto, a estrutura dos blocos de 18 kN/m^3 , embora estável nos primeiros minutos, pouco tempo bastou para que houvesse um colapso total da mesma. Por outro lado, e como esperado, os cubos de peso volumico de 28 kN/m^3 resistiram sem qualquer movimento durante todo ensaio.

Foi concluído que os blocos de 18 kN/m^3 apenas resistem a uma altura de 0,06 m e colapsaram com uma altura de onda de 0,08 m. À escala utilizada de 1:50, estas alturas de onda correspondem a respetivamente a 3 e 4 m. Isto representa uma altura de onda muito pequena e raramente é usada para calcular estruturas expostas a grande agitação marítima. Os blocos de peso volumico de 18 kN/m^3 apenas foram utilizados como referência para trabalhos futuros.

Os cubos de peso volumico de 25 kN/m^3 começaram a ser ensaiados apenas no terceiro ensaio da quinta série juntamente com os de 28 kN/m^3 .

O terceiro ensaio começou com uma altura de onda pequena de 0,08 m. Os blocos de 25 kN/m^3 resistiram bem a todo o ensaio com apenas um cubo a ser deslocado. As seguintes figuras mostram a estrutura antes e depois do ensaio, respectivamente. Relembra-se que o canal é dividido em dois para economizar o número de blocos utilizado. Os blocos de cor cinzenta são de 25 kN/m^3 enquanto os cubos amarelos são de peso volumico de 28 kN/m^3 .



Figura 25 – Terceiro Ensaio da Sexta Série

Esta altura de onda é muito reduzida para provocar instabilidade a cubos com o peso volúmico ensaiado. O facto de se ter registado apenas uma queda pode prender-se com a possibilidade do cubo estar mal apoiado no manto mesmo antes do início do ensaio. Situação normal e pouco preocupante.

O seguinte ensaio, com os mesmos cubos de 25 kN/m^3 , consistiu em avaliar a estrutura com uma altura de onda de 0,10 m.

O ensaio decorreu sem nenhum tipo de problema. Ao minuto 17 houve a queda de um bloco que ao cair fez com que outro cubo caísse também. Um terceiro bloco sofreu instabilidade ao fim de 25 minutos de ensaio.

A Figura 26 mostra o antes e o depois dos 30 minutos de ensaio. Na figura da direita, os blocos deslocados foram identificados com uma circunferência vermelha para melhor compreensão.

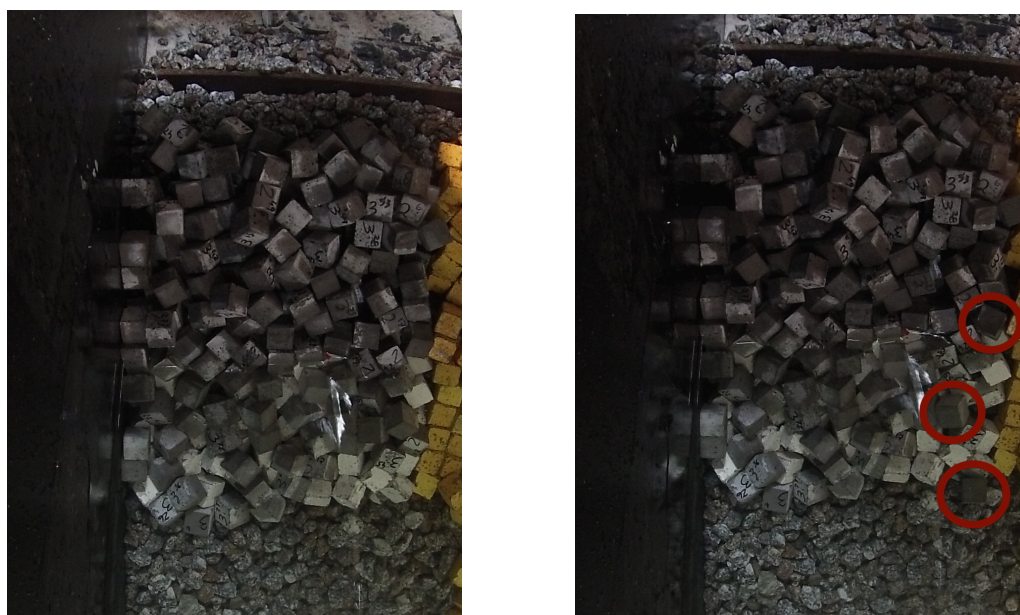


Figura 26 – Quarto Ensaio da Sexta Série

Este resultado demonstra que a estrutura é estável pois os três cubos deslocados apenas correspondem a 1,4 % do total. Foi necessário por isso aumentar em 0,02 cm a altura de onda dos ensaios.

O quinto ensaio desta série começou por recolocar todos os blocos do manto de 25 kN/m^3 e ensaiar uma altura de onda de 0,12 m.

Logo de início, o manto mostrou-se algo instável com duas quedas a serem registadas nos primeiros 5 minutos de ensaio. Progressivamente, foram identificadas todas as quedas. O ensaio terminou e totalizou-se 5 cubos deslocados. Isto corresponde a cerca de 2,5% do total dos cubos. Continua a ser uma estrutura estável embora apresente já indícios de alguma fragilidade.

A Figura 27 evidencia as 5 quedas durante deste quinto ensaio da presente série.

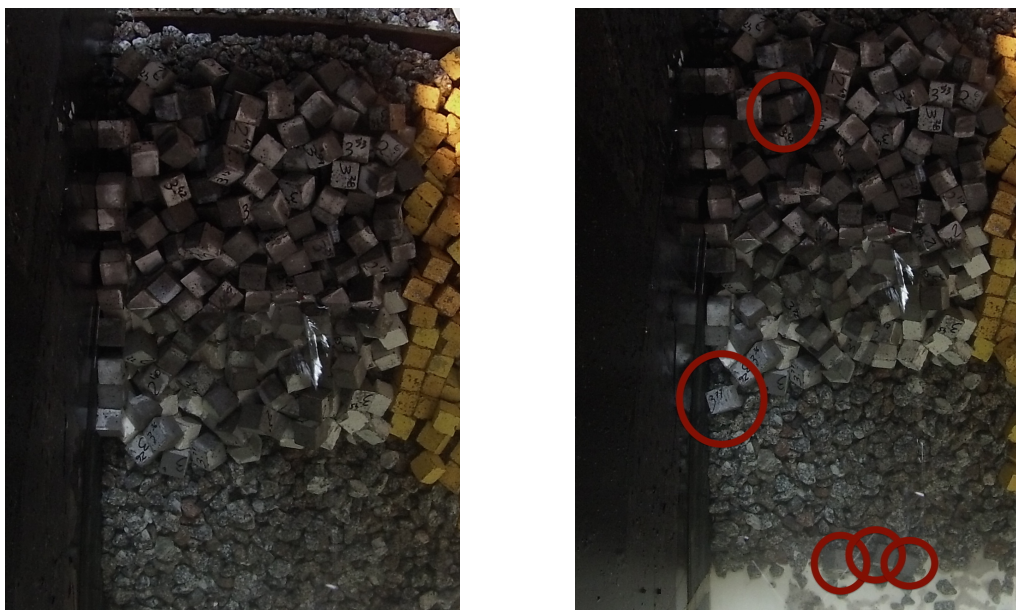


Figura 27 – Quinto Ensaio da Sexta Série

Como foi notório no ensaio anterior que a estrutura estava bastante frágil, com alguns cubos que se movimentaram mas sem registar quedas, foi decidido aumentar para 0,13 m a altura de onda.

Desde o início do ensaio, registaram-se duas quedas e ao fim de cerca de 20 minutos a camada superficial do manto abateu por completo. Concluiu-se logo que o limite dos cubos de peso volúmico de 25 kN/m^3 é, neste caso, uma altura de onda de 0,13 m.

O resultado é de difícil visualização como demonstra a Figura 28.



Figura 28 – Sexto Ensaio da Sexta Série

Segundo Hudson, estes cubos de 25 kN/m^3 de peso volúmico não resistiriam a uma onda superior a 0,11 m, no entanto os resultados verificados no modelo demonstraram instabilidade apenas no ensaio cuja altura de onda foi de 0,13 m. Isto traduz-se numa altura de onda em protótipo de 6,5 m.

Pode-se logo concluir que, relativamente aos cubos de 18 kN/m^3 , os blocos de peso volúmico de 25 kN/m^3 resistiram a uma altura de onda quase do dobro, de 3,5 m para 6,5 m.

O seguinte conjunto de cinco ensaios avaliou o limite dos cubos de 28 kN/m^3 de peso volúmico.

O primeiro ensaio dos blocos de peso volúmico de 28 kN/m^3 foi para uma altura de onda de 0,08 m. O manto resistiu durante todo o período de ensaio sem qualquer movimento e sem qualquer queda.

Os blocos foram todos recolocados na estrutura e seguiu-se um ensaio cuja altura de onda foi de 0,10 m.

Durante este ensaio verificou-se pouco movimento dos blocos e apenas três cubos sofreram quedas no manto. A inexistência de imagens que comprovam o ensaio deveu-se ao facto de ter ocorrido um erro no fim do ensaio. Esse erro provocou um movimento brusco na pá do gerador de ondas que criou uma onda muito superior à ensaiada. A estrutura abateu totalmente. Contudo, o manto manteve-se estável com apenas três quedas registadas que corresponde a 1,4% do número total dos cubos.

O nono ensaio consistiu em expôr os cubos de 28 kN/m^3 a uma altura de onda de 0,12 m. Os resultados foram bastante positivos com seis blocos instáveis, cerca de 3% do número total dos cubos da estrutura.

Na Figura 29 é notório o antes e o depois do ensaio respectivamente.

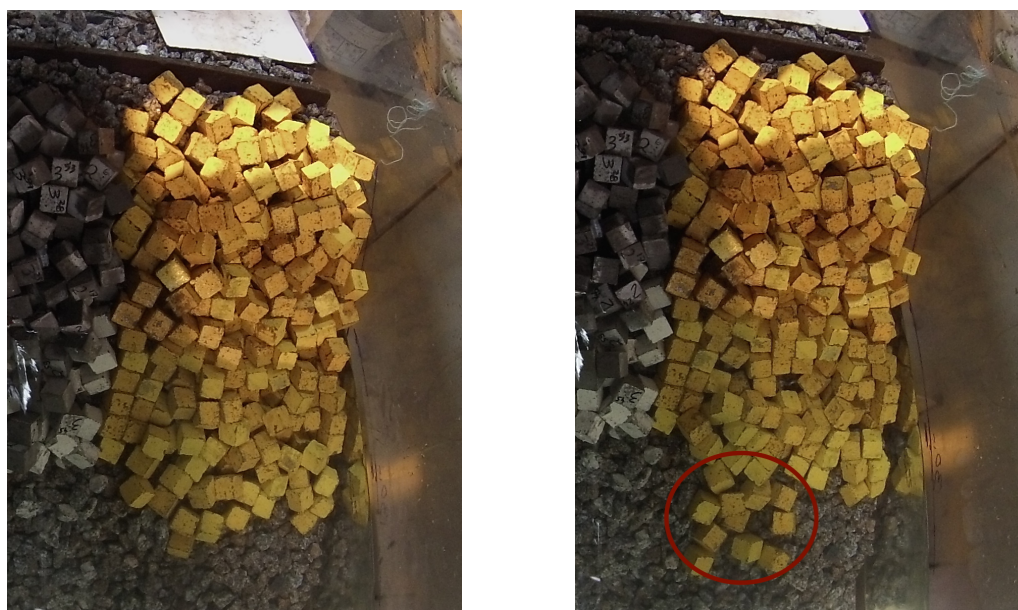


Figura 29 – Nono Ensaio da Sexta Série

As seis quedas dos blocos foram essencialmente na camada superficial do manto. Foi registado uma primeira queda de um bloco ao fim do 10º minuto de ensaio, os seguintes cinco cubos sofreram insatabilidade pouco tempo depois da primeira queda.

O primeiro cubo ao ser deslocado poderá ter criado uma instabilidade maior no manto e terá conduzido à queda dos outros cinco cubos.

O seguinte ensaio desta série expôs os cubos de 28 kN/m^3 a uma altura de onda de 0,13 metros. O resultado deste décimo ensaio da presente série foi uma instabilidade de sete blocos.

As fotografias tiradas antes e depois dos ensaios, respetivamente, são apresentadas na Figura 30.

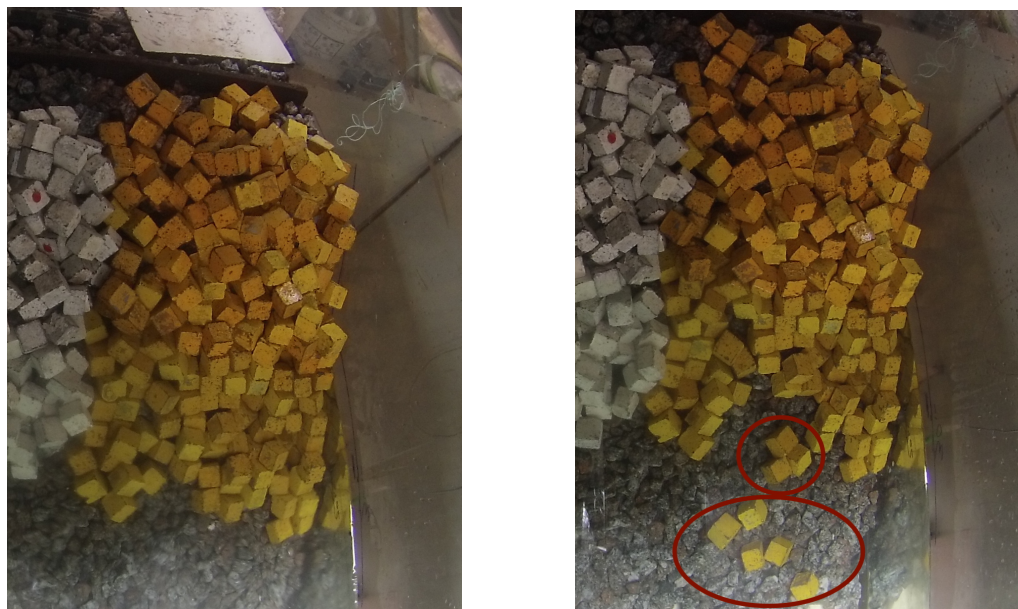


Figura 30 – Décimo Ensaio da Sexta Série

Teoricamente, uma altura de onda de 0,13 m seria o limite suportado pelos blocos de peso volúmico de 28 kN/m^3 . No entanto, este ensaio veio comprovar que, embora tenham sido deslocados sete cubos, a estrutura é considerada estável. Os sete cubos correspondem a uma percentagem de 3,3% de cubos deslocados, valor inferior ao limite de 5% para que uma estrutura passe a ser considerada instável.

Como a estrutura continuava estável, a altura de onda foi aumentada para 0,14 m. O ensaio é descrito nos seguintes parágrafos.

O décimo primeiro ensaio da sexta série pôs à prova os cubos de peso volúmico de 28 kN/m^3 para uma altura de onda de 0,14 m. A instabilidade do manto foi tal que este abateu-se por completo. A destruição foi tão elevada que maior parte dos cubos deslocados foram encontrados já fora da risberma. A destruição foi verificada cerca de 10 minutos após o início do ensaio. As seguintes imagens demonstram a intensidade do resultado deste ensaio com imagens de antes e depois deste, respetivamente, Figura 31.

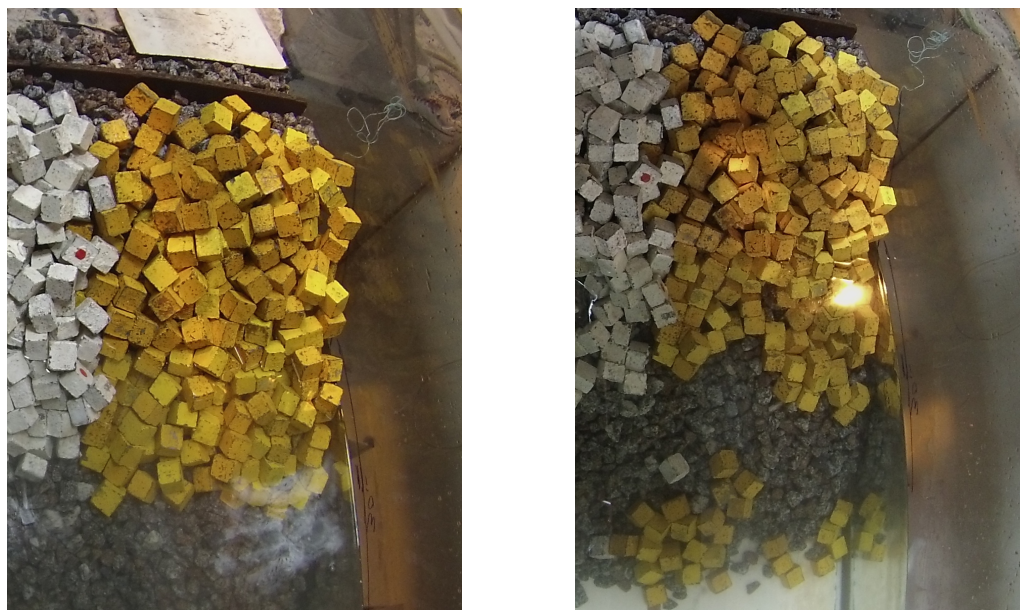


Figura 31 - Décimo Primeiro Ensaio da Sexta Série

A destruição era evidente após o 25º minuto e como tal, o ensaio foi interrompido para que não houvesse uma destruição grave do modelo.

Foi concluído que os cubos de 28 kN/m^3 não resistiram a uma altura de onda de $0,14 \text{ m}$. Isto corresponde em protótipo a uma onda de altura de 7 m . Os ensaios tiveram resultados positivos e esperados. Segundo Hudson, esta estrutura sofreria instabilidade a partir de uma altura de onda de $0,129 \text{ m}$. Os resultados foram muito semelhantes aos esperados e com resultados plausíveis.

Por fim, foram ensaiados cubos com um peso volúmico bastante elevado de 31 kN/m^3 . Esta elevada densidade foi conseguida graças a uma limalha de magnetite cuja composição foi anteriormente descrita. Devido à escassez de magnetite apenas foram construídos 80 cubos com um peso volúmico elevado dos 215 blocos necessários. Mesmo assim, o manto foi na mesma construído com 215 cubos, dos quais 80 com um peso volúmico de 31 kN/m^3 . Estes foram colocados apenas na camada superficial do manto e na área mais exposta à agitação.

No 12º ensaio desta série foram reproduzidas ondas de $0,12 \text{ m}$ nos blocos de 31 kN/m^3 . Este ensaio teve uma duração, já habitual, de 30 minutos. Não foi registado nenhum bloco caído durante o ensaio, apenas ligeiros movimentos. Estes movimentos são normais e devem-se à colocação aleatória dos mesmos. Por vezes, durante a construção do manto e por forma a replicar as dificuldades reais na colocação dos blocos, os cubos ficam mal apoiados entre eles e necessitam de alguma agitação para ficarem estáveis.

Com o manto totalmente estável foi necessário aumentar a altura de onda para $0,13 \text{ m}$. Isto deu início a mais um ensaio, desta vez ao 13º da sexta série.

No 13º ensaio da sexta série começou por haver uma recolocação de todos os blocos, como tem sido sempre feito. O ensaio decorreu bem sem nenhum incidente. O manto sofreu apenas duas quedas. Na Figura 32 é apresentado duas imagens antes e depois do ensaio, respetivamente.



Figura 32 – Décimo Terceiro Ensaio da Sexta Série

Com apenas duas quedas, cerca de 1%, o manto demonstrou-se estável e com condições para que as condições do ensaio fossem agravadas. Daí ter surgido o 14º ensaio que contou com uma altura de onda de 0,14 m. É lembrado que 0,14 m foi o limite dos cubos de peso volúmico de 28 kN/m^3 que foram anteriormente ensaiados.

A altura de onda do 14º ensaio foi de 0,14 m. O ensaio decorreu sem que houvesse algum incidente inesperado. O resultado no fim do ensaio foram quatro cubos deslocados.

Logo no início do ensaio foi registada uma queda e à medida que o ensaio decorria foram-se registando as sucessivas três quedas. A primeira queda deu-se no lado direito do manto. As restantes três quedas foram consequência de um movimento de um cubo que ao cair, embateu em dois outros provocando mais duas quedas (lado esquerdo do manto). Na Figura 33 é evidente as quatro quedas deste ensaio.



Figura 33 – Décimo Quarto Ensaio da Sexta Série

Quatro cubos deslocados apenas corresponde a uma percentagem de 1,9%, como tal a estrutura continua a ser considerada como estável. Como ainda não tinha sido atingido a instabilidade da estrutura e como o gerador de ondas ainda conseguiria reproduzir uma altura de onda superior à ensaiada foi elaborado um último ensaio. Este ensaio iria pôr o gerador de ondas no limite da sua capacidade de gerar ondas com eficácia, segundo as curvas de desempenho no Gráfico 1.

O 15º e último ensaio desta série contou com uma altura de onda, como já foi anteriormente referido, de 0,15 m. Como esperado, houve um agravamento no número de cubos instáveis, desta vez foram contabilizados sete blocos de peso volúmico de 31 kN/m^3 . Embora pareça que um aumento de 0,01 m na altura de onda não seja relevante, foi bastante notório o agravamento nas condições no canal. A Figura 34 mostra o antes e depois do ensaio respetivamente.



Figura 34 - Décimo Quinto Ensaio da Sexta Série

A instabilidade deu-se na zona central do manto e apenas na camada superficial. É visível que devido à elevada densidade dos blocos. Os cubos são transportados com bastante dificuldade, prova disso é a sua proximidade do talude, isto é, em casos anteriores, os blocos ao caírem pelo talude só param depois da risberma.

Os sete cubos correspondem a 3,3% do número total de cubos. Teoricamente a estrutura é estável mas já começa a dar sinais de alguma instabilidade. Alguns blocos foram observados com bastante movimento o que denota um eminente colapso do manto.

Embora 0,15 m fosse a altura de onda limite para a profundidade observada no canal (0,30 m) foi feito mais um ensaio com uma onda de 0,16 m.

O 16º ensaio foi abortado poucos minutos após ser iniciado uma vez que as ondas rebentavam à saída do batedor do gerador de ondas. É sabido que uma onda que rebente à saída do batedor perde todas as suas propriedades, como tal, o ensaio deixa de ser válido. A Figura 35 retrata o sucedido.



Figura 35 - Onda a rebentar à saída do Batedor

Foi concluído que o limite da altura de onda para os blocos de 31 kN/m^3 é de 0,15 m. Esta altura de onda de 0,15 m corresponde, em protótipo, a 7,5 m. Esta altura pode parecer bastante reduzida em protótipo mas é de notar que cubos de 3,5 cm de aresta equivalem, à escala utilizada (1:50), a blocos de 1,75 metros que também são, relativamente, pequenos.

4.2. ANÁLISE

Levou algum tempo, não só a aprender, como também a encontrar o perfeito funcionamento de todos os equipamentos. Só com a série número seis é que foi encontrada a harmonia entre todos os equipamentos e os ensaios decorreram quase na perfeição como já foi descritos.

A Tabela 15 relaciona a altura de onda, em modelo, com o peso volumico dos cubos tornando mais compreensível o limite de altura de onda, segundo Hudson, com as quatro densidades dos quatro tipos de cubos.

Tabela 15 - Relação teórica entre a altura de onda com o peso volumico dos blocos

$\frac{\text{m}}{\text{kN/m}^3}$	0,06	0,08	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15
18	LIMITE	KO	KO	KO	KO	KO	KO
25	OK	OK	LIMITE	KO	KO	KO	KO
28	OK	OK	OK	OK	LIMITE	KO	KO
31	OK	OK	OK	OK	OK	OK	LIMITE

O limite teórico calculado pela fórmula de Hudson não foi muito diferente dos resultados obtidos através dos ensaios. A Tabela 16, semelhante à anterior, sintetiza o resultado dos ensaios assim como identifica o número de cubos instáveis durante o ensaio em questão.

Tabela 16 - Relação experimental entre a altura de onda com o peso volumico dos blocos

$\frac{\text{m}}{\text{kN/m}^3}$	0,06	0,08	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15
18	1 CUBO	KO	KO	KO	KO	KO	KO
25	OK	1 CUBO	3 CUBOS	5 CUBOS	KO	KO	KO
28	OK	OK	3 CUBOS	6 CUBOS	7 CUBOS	KO	KO
31	OK	OK	OK	OK	2 CUBOS	4 CUBOS	7 CUBOS

Com a análise desta tabela não é possível definir uma fronteira da instabilidade da estrutura pois, na realidade, ela não existe. Na verdade existe um intervalo em que a estrutura ainda estável, leia-se ainda capaz de resistir às ações da agitação marítima sem comprometer a segurança, começa a sofrer indícios de alguma fragilidade. A queda de cubos é um fenómeno normal que leva a que a estrutura esteja em constante reabilitação durante a sua vida útil. É normal que sejam construídos mais cubos

que o necessário a fim de reparar a estrutura de uma forma rápida sem que haja longos atrasos que poderiam comprometer a segurança de toda a estrutura.

5

SÍNTESE, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Já existe um razoável conhecimento acerca da utilização de betões de elevado peso volúmico em estruturas portuárias. No entanto existe alguma dificuldade em conseguir arranjar o material em grandes quantidades e de forma económica. Alguns fatores como o transporte, o custo e as jazidas disponíveis para exploração podem condicionar a sua execução e até inviabilizar a sua aplicação em obra. Por outro lado, os benefícios na utilização de betão de elevado peso volúmico são reconhecidos. Tomando um bloco de betão de elevado peso volúmico e comparando com um bloco, com o mesmo volume mas de peso volúmico inferior conclui-se que o primeiro é mais pesado que o segundo, traduzindo-se numa maior estabilidade. Em obra, este facto pode representar, não só numa redução no número de cofragens mas por outro lado, num aumento do nível de segurança. A fórmula de Hudson propõe que um bloco, com dimensões fixas, resistirá a uma altura de onda tanto maior quanto maior for o seu peso volúmico.

A presente dissertação conseguiu evidenciar, experimentalmente, a maior estabilidade de mantos protegidos com cubos de elevado peso volúmico. Os quatro modelos idênticos de cubos com pesos volúmicos de 18, 25, 28 e de 31 kN/m³ foram todos expostos a condições de ensaio iguais fazendo apenas variar a altura de onda incidente. A altura de onda para qual a estrutura demonstrou instabilidade variou com o peso volúmico de cada tipo de cubo. As alturas de onda limite foram, respectivamente, 0,08; 0,13; 0,14 e 0,16 m. É notório uma crescente estabilidade dos cubos de peso volúmico menores para os de peso volúmico superior. Isto levou a que os ensaios fossem o mais semelhante possíveis fazendo com que as diferenças de ensaio para ensaio fossem pequenas e que os resultados dependessem apenas das variáveis do peso volúmico dos cubos e da altura de onda.

Os mantos de estruturas portuárias podem adotar variadíssimas formas, no entanto o cubo é até hoje a forma individualmente mais resistente. No futuro seria interessante desenvolver estruturas com elementos de proteção mais complexos como os Tetrápodes ou como os Acropodes com um peso volúmico elevado logo com uma resistência mais elevada. Estes blocos são mais eficazes pois permitem uma interligação entre eles que leva a que a resistência da estrutura seja maior. A dissipação da energia por parte destes blocos é melhor e ao serem construídos com betão de elevado peso volúmico faria com que a sua eficiência aumentasse.

6 BIBLIOGRAFIA

Coastal Engineering Manual - Part VI – Design of Coastal Project Elements

Professor Doutor Francisco Taveira Pinto, *Quebramares de Taludes (2ª Aula – 2013/14) Rubble Mound Breakwaters Diques de Taludes*, 2013

Hans F. Burcharth, *Aspects related to design and construction of breakwaters in deep water*. Symposium Design and Construction of Deep Water Maritime, 2007, Aalborg University, Denmark

Ricardo A. F. Teixeira. *Quebramares Portugueses: Inventário análise comparativa de soluções*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012

Fernando Veloso Gomes, *Quebramares III, Exemplos de Quebramares Dimensionamento*, 2014

Hugo G. Lopes. *Ensaio em Modelo Físico do Comportamento Hidráulico e Estrutural do Quebramar Norte do Porto de Leixões*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.

Triemstra. *The use of high-density concrete in the armourlayer of breakwater*. Dissertação de Mestrado, 2000.

van Zwicht, B.N.M., Verhagen, H.J., Bakker, P.B. *Effect of the Concrete Density on Stability of XBLOC Armour Units*, 2010

http://www.etermar.pt/publicacoes_obras.htm. 18/12/2014

http://www.hipersuper.pt/wp-content/uploads/2010/07/porto_sines.jpg. 18/12/2014

www.google.pt/maps/@37.9519312,-8.8485672,9362m/data=!3m1!1e3. 18/12/2014

[http://1.bp.blogspot.com/-](http://1.bp.blogspot.com/-WhvYF8i8TVs/T0K0iRFDyII/AAAAAAAAABJE/DmYpKwtHh7E/s400/IMG_6459.JPG)

[WhvYF8i8TVs/T0K0iRFDyII/AAAAAAAAABJE/DmYpKwtHh7E/s400/IMG_6459.JPG](http://1.bp.blogspot.com/-WhvYF8i8TVs/T0K0iRFDyII/AAAAAAAAABJE/DmYpKwtHh7E/s400/IMG_6459.JPG). 7/01/2015

http://es.wikipedia.org/wiki/Puerto_de_La_Coruña . 26-01-2015

<http://guias.masmar.net/var/masmar/storage/images/gu%C3%ADas/galer%C3%ADas/galicia/a-coru%C3%ADa-.instalaciones-portuarias.-puertos-deportivos/puerto-exterior-punta-langosteira/443584-1-esl-ES/Puerto-Exterior-Punta-Langosteira.jpg> . 26-01-2015